

# El Láser-Escáner 3D aplicado al patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba: la Torre del Homenaje

DIEGO FRANCISCO GARCÍA MOLINA  
FRANCISCO DE PAULA MONTES TUBÍO  
Universidad de Córdoba

## RESUMEN

Este artículo tiene como finalidad contribuir a profundizar en la cada vez más frecuente aplicación del Láser Escáner Terrestre centrando nuestro estudio en dos objetivos, la documentación y divulgación del patrimonio arquitectónico. Como principal herramienta de trabajo hemos empleado el modelo de Leica C10, un instrumento topográfico que permite realizar una captura de datos que proporciona información de la posición, la intensidad y el color de cada uno de los millones de puntos que constituyen la base de datos de nuestro futuro modelo 3D.

Nuestra experiencia se centrará tanto en la utilización de la tecnología de escáner con láser en la toma de datos en campo, como en las labores de post-proceso en uno de los monumentos más significativos de Priego de Córdoba: la Torre del Homenaje ubicada dentro del recinto del Castillo de la citada localidad.

La primera fase de nuestro trabajo ha consistido en afrontar los problemas acaecidos en la toma de datos en campo: la correcta distribución de posiciones, la resolución de captura y el proceso en la toma de imágenes digitales; siempre con el propósito de obtener una representación lo más fidedigna del elemento. La segunda fase fue el post-proceso, que mediante el uso de un software específico, nos proporciona una base de datos con información milimétrica, o lo que es lo mismo, un modelo poligonal 3D con resolución piedra a piedra, tanto para las zonas exteriores como interiores de la torre.

**PALABRAS CLAVE:** Patrimonio arquitectónico, Láser Escáner Terrestre, nube de puntos, tecnología, documentación, preservar, divulgar, modelo tridimensional, ortoimágenes, alta definición, sillares, mampostería.

## ABSTRACT

This article aims to contribute deepening on the increasingly frequent application of 3D laser-scanner in the documentation and dissemination of heritage. The main tool used was the Leica model C10, a surveying instrument that allows a data collection that provides information on the position, intensity and color of each one of the millions of points that make up the database our future 3D model.

Our experience, based both on the use of LIDAR (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranking*) technology in the field data collection, as in post-processing work on one of the most significant monuments of Priego de Córdoba: la Torre del Homenaje, inside the enclosure of that locality's castle.

The first objective has been to solve the problems occurring in data collection in the field: the correct distribution of positions, the resolution capture and processing in the data collection, with a view to obtain a representation as accurate as possible. A second objective was to post-process using a specific software to obtain a database with millimetric information, that is to say: a 3D polygon model with a stone to stone resolution, both for outdoor areas as well as the tower's interior.

**KEY WORDS:** Architectural heritage, Terrestrial Laser Scanner, point cloud, technology, documentation, preservation, disseminated, three-dimensional model, orthoimagery, high definition, ashlar, masonry.

## INTRODUCCIÓN

El Patrimonio, tal y como lo define la propia UNESCO (2003), es “el legado del pasado, con el que vivimos ahora, y que será recibido por generaciones futuras”. Es evidente que el verdadero potencial del Patrimonio está en su capacidad de ser estudiado, visitado o disfrutado, por lo que en la mayoría de las ocasiones conlleva un desgaste y un envejecimiento prematuro del sitio en cuestión, bien sea por la amenaza de las condiciones ambientales, de la inestabilidad estructural, o bien por el aumento del turismo y del desarrollo. Lo que sí es evidente es que, en la mayoría de los casos, no está apropiadamente documentado, y una vez que una parte del Patrimonio se pierde, se pierde para siempre.

En las últimas décadas se vienen demandando nuevos métodos de documentación y estudio, tratando de buscar respuesta en los constantes avances en el ámbito de la informática gráfica y en algunos estudios dentro del campo científico vinculado con la arqueología<sup>1</sup>. En la actualidad, destaca un sistema de digitalización 3D con numerosas posibilidades para el análisis, documentación, divulgación, y conservación de nuestro Patrimonio: el láser escáner terrestre<sup>2</sup>, a partir de ahora denominado láser escáner 3D. Este sistema, en combinación con otras técnicas de documentación digital y tradicional, ofrece una solución útil para la documentación de todas las características espaciales y geométricas a través del desarrollo de una base de datos, realmente fiel y que nos permita conservar en memoria digital este legado.

Cabe destacar algunos avances en las últimas décadas en relación a la captura de nubes de puntos por medio de Láser Escáner 3D: NUÑEZ ANDRÉS et al. 2009:8; MONSERRAT, et al. 2008:13; ARAYICI, 2007:14.

Como vamos a ver, esta tecnología nos ofrece, por un lado, una herramienta para analizar o visitar estos sitios reduciendo el impacto físico en los casos en los que las edificaciones no logren superar más los asaltos del tiempo (STONE et al. 2006:12), o bien proporcionarnos la información necesaria para la restauración o inclusive reconstrucción de nuestro Patrimonio, (MAÑANA-BORRAZÁS et al. 2008:17). Como apunte cabe destacar que hoy día cualquier experto puede simular, discutir y evaluar diversas soluciones de restauración o distintas teorías sin ni siquiera tocar el original. Utilizando un visualizador adecuado se podrá obtener una representación digital de la realidad, explorar en tiempo real cualquier parte del monumento, realizar medidas y generar ortoimágenes arquitectónicas.

Dentro de esta temática es donde se ubica nuestro proyecto, el levantamiento de Alta Definición (HDS) con el láser escáner 3D de la Torre del Homenaje de Priego de Córdoba (Lám.1). El encuadre del citado trabajo pasa por dos objetivos: uno la documentación y otro la divul-

gación de unos de los símbolos de nuestro Patrimonio Arquitectónico.

Como hemos comentado anteriormente nuestro primer objetivo es documentar. Este proceso no pasa sólo por tener un archivo histórico del citado monumento, sino que además trata de proporcionar una amplia base de datos para los arqueólogos, restauradores y arquitectos ante una posible actuación que con el paso de los años pudiera afectar a esta edificación.

La otra propuesta es el aspecto divulgativo que se centra en la búsqueda de un modelo tridimensional homogéneo en resolución. Recordemos que el objetivo es la representación piedra a piedra, ya que se trata de ver un elemento patrimonial en su conjunto.

Ambas propuestas se centran en el uso de un sistema de digitalización 3D y de software específico. Existen en el mercado diversos tipos de láser escáner 3D, marcas comerciales y una cantidad cada vez mayor de programas informáticos para manejar estos datos. En nuestro trabajo hemos empleado el modelo de láser escáner 3D es el C10 de Leica y los programas *Leica Cyclone* y *3DReshaper* para la toma de datos y post-procesado de los mismos.



Lám. 1: Vista de la T H. desde la posición 2, para el HDS.

1) El proyecto *Archeoguide* hace uso de esta técnica para mostrar al público reconstrucciones de edificios de la antigua Olimpia mientras pasean por el entorno real (*Archeoguide*, 2003).

2) Láser Escáner Terrestre (Terrestrial Laser Scanning, TLS), por diferencia con otras herramientas de características similares, como el cada vez más extendido LIDAR, que opera sobre una plataforma aerotransportada

### EQUIPOS

Como anotación previa destacamos algunas ventajas e inconvenientes de la tecnología empleada: puede llevarse a cabo con un mínimo de instrumentos en campo y de manera rápida, reduciendo de forma notable el trabajo a desarrollar fuera de la oficina. En contra de este aspecto diremos que su manejo no resulta sencillo y es, por tanto, de difícil aprendizaje.

#### INSTRUMENTAL PARA EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE ALTA DEFINICIÓN

*Láser escáner 3D (TLS) de Leica ScanStation C10 (Lám. 2)*

- Sistema de medición de impulsos
- Precisión de 2mm.
- Rango de acción que va desde 0,5m a 300m.
- Posee una velocidad de escaneo de 50.000 puntos/seg.
- Campo visual de 270° x 360°



Lám. 2: Imagen del láser escáner 3D utilizado para el HDS.

Estos parámetros lo hace un equipo ideal para la escala del edificio en estudio y por lo tanto nos da como resultado una base de datos muy precisa para la documentación buscada. Esta información en forma de nube de puntos 3D nos proporciona datos referidos a un sistema de coordenadas

cartesiano (x, y, z). La visualización de esta nube de puntos puede alcanzar gran realismo ya que permite representar el color de la superficie documentada RGB (Red, Green, Blue). Esto es posible gracias a la cámara fotográfica que el instrumento tiene integrada. Por último y completando los 7 datos asociados a cada punto obtenemos la Intensidad (i) valor de reflectancia de los materiales. Su forma es muy similar a la de una estación total, aunque de mayores dimensiones y peso, lo que supone un importante esfuerzo para trasladar y colocar el aparato. Además es necesario emplear para la toma de datos en campo unas baterías externas para alimentar el instrumento.

Respecto a la obtención de las imágenes se utilizó tanto la cámara interna del propio láser escáner 3D como una cámara digital externa.

*Cámara digital Canon EOS D-350*

- Resolución máxima de 8,2 Mpixels (3456 x 2304 pixels).
- Objetivo Canon 18-55 mm. f3.5-5.6.

*Cyclone External Camera Workflow-Nodal Ninja Bracket (NNB) (Lám. 3).*



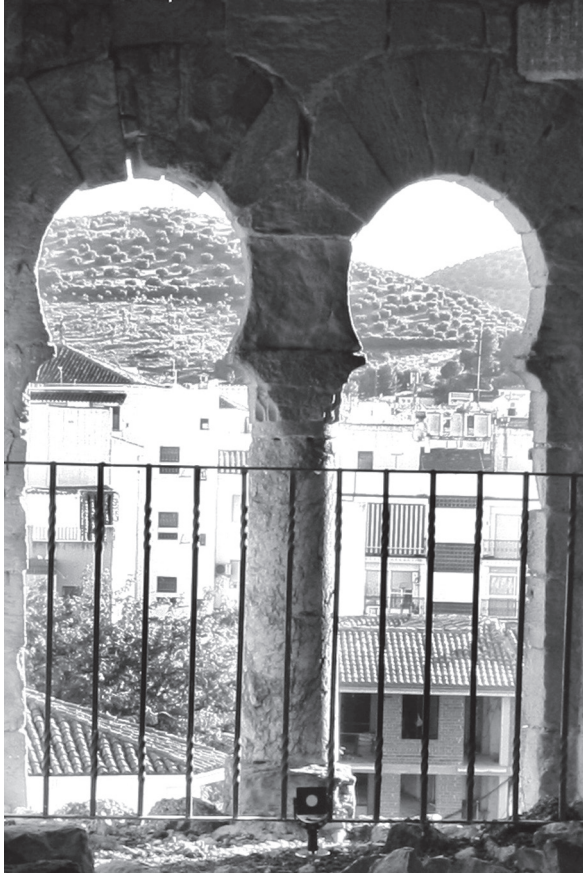
Lám. 3: Vista del NNB y cámara digital sobre el trípode del TLS.

#### Dianas de control

Es un elemento de registro que el láser escáner 3D mide con precisión cuya posición fija en cada escaneo sirve como referencia para poder combinarlos. Son necesarias un mínimo de 3 dianas de control desde cada posición de escaneo para asegura una unión con un reducido margen de error (Lám. 4).



- Tipo 1 (papel) HDS B/W Tgt
- Tipo 2 (Cuadrada) HDS Tgt 3 inch
- Tipo 3 (Circular) HDS Tgt 6 inch
- Tipo 4 (Trípode) HDS Tgt 3 inch
- Tipo 5 (Cuadrada) HDS Tgt 6 inch
- Tipo 6 (Magnética.) HDS Tgt 3 inch



Lám. 4: Vista de una diana cuadrada HDS Tgt 3 inch situada bajo el arco de herradura.

## SOFTWARE NECESARIO EN LOS TRABAJOS DE GABINETE

### *Leica Cyclone 7.1.3*

Los módulos del programa *L. Cyclone* ofrecen a los usuarios de nubes de puntos una amplia gama de opciones para proyectos de escaneos con el láser escáner terrestre TLS para aplicaciones de ingeniería, topografía y construcción.

### *3DReshaper 6.1.0*

Es un software diseñado para leer y tratar nubes de puntos 3D en cualquier formato. Esta herramienta de análisis de diseño informático de punto y vectores permite mantener sólo aquellos elementos que son estrictamente pertinentes de acuerdo con una tolerancia predefinida. A continuación, los puntos que se conserven pueden ser mallados para obtener un poliedro con caras triangulares.

### *Ptgui\_Pro*

Este software nos permite importar una serie de fotografías que hayan sido hechas para su posterior unión. El programa realiza el proceso mediante puntos comunes o puntos de control.

### *Adobe PhotoShop CS*

Utilizado para el tratamiento y retoque de las imágenes digitales.

## HARDWARE NECESARIO EN LOS TRABAJOS DE GABINETE

### *Ordenador personal*

Pentium ® Dual-Core CPU ES300 @ 2.6 GHz, 2 Procesadores con 4GB de RAM, 100 GB de disco duro, tarjeta gráfica NVIDIA GeForce GT 220 y un monitor LG L1917S de 19".

Por último en relación a este punto debemos de aclarar que el software utilizado necesita ordenadores potentes; en nuestro caso la nube de puntos captada resultó de 425 millones de puntos, lo cual dificulta el trabajo de post-proceso en cualquier lugar y bajo cualquier circunstancia.

## METODOLOGIA

Se denomina Documentación Geométrica de Alta Definición (*High-Definition Survey, HDS*) al método de medición no intrusivo que permite una captura de información rápida, detallada y precisa de una superficie o volumen por medio de una herramienta basada en la tecnología del láser escáner 3D.

La metodología empleada consta de dos fases: toma de datos en campo y procesamiento de información en gabinete.

## FASE I: TOMA DE DATOS EN CAMPO (TDC)

### *Planificación*

La planificación comienza con la elección del láser escáner 3D. Una vez realizado este proceso en función de la geometría del objeto a registrar, las necesidades de representación y en consecuencia la resolución de captura, se procede a determinar cuáles serán las posiciones del láser escáner 3D más óptimas en nuestro proyecto. Para ello tendremos en cuenta:

- Orden en que se tienen que realizar el levantamiento de alta definición (HDS).
- Cálculo aproximado de tiempos en realizar cada barrido.
- Horarios más conviene para la toma de datos, por efecto de la luz solar.
- Condiciones climáticas.
- Suministro de energía (baterías).

Como apunte significativo y con el fin de asegurar una toma de datos apropiada y de alta calidad insistiremos en la importancia de estos puntos y más concretamente en el buen desarrollo de esta fase.



### *Captura de datos y Resultados*

La toma de datos con el láser escáner 3D implica la medición de puntos y el fotografiado del área a escanear, estableciendo en este momento la resolución o densidad de puntos con la que se desea registrar un elemento.

El funcionamiento es muy sencillo: el rayo láser es desviado verticalmente mediante el uso de un espejo poligonal, este movimiento, combinado con la base rotatoria del sistema, permite adquirir una escena con un gran campo de visión (FOV = 360° H x 270° V). Todos los datos son almacenados en el disco duro del propio aparato tanto los del propio escaneo como las fotos captadas con la cámara interna. El propio láser escáner 3D posee una pantalla táctil con un interfaz intuitivo, en el que podemos realizar un gran número de tareas de configuración, visualización y manipulación de los datos.

Para completar la captura de datos hemos decidido utilizar después de cada escaneo una cámara digital externa calibrada sobre el mismo trípode que se ha utilizado con el láser escáner 3D (con un soporte especial articulado de Leica, el *Nodal Ninja bracket*) y como elemento de referencia, para poder combinar los escaneos, no debemos de olvidar el uso de las dianas de control.

En la mayoría de los trabajos de digitalización 3D el proceso de registro, se realiza dentro de un itinerario con distintas posiciones, posibilitando que los distintos sistemas de coordenadas locales generados por cada barrido láser, constituyan un único sistema de referencia.

La problemática en la toma de datos (BOHELER et al, 2003) puede surgir al realizar la elección de estos posicionamientos, ya que una distancia no recomendable combinada con una orientación oblicua puede afectar negativamente a la calidad del registro provocando ruido o residuos en la nube de puntos que se obtenga.

Un aspecto importante a destacar de esta fase son las propiedades reflectantes de las superficies escaneadas. Los parámetros que afectan y determinan la fuerza de la señal de retorno que recoge el láser escáner 3D son:

- Los colores oscuros tienen un factor de desviación más alto y acumulan más error, aunque eso también depende del tipo de espectro del láser (rojo, verde...).
- Tipo de material y su textura: las brillantes y lisas tienen un factor de reflexión más fuerte que las mates y rugosas, por lo tanto estas últimas acumulan más error.

Una vez realizado el itinerario topográfico teniendo en cuenta las citadas consideraciones obtendremos nuestro primer resultado, una base de datos formada principalmente por imágenes y nubes de puntos. El archivo que almacena esa base de datos tiene una extensión propia de *Leica Cyclone* (.imp) y gran capacidad de compresión.

### **FASE II: PROCESADO DE DATOS EN GABINETE (PDG)**

En esta etapa la información recogida en campo pasa una serie de procesos extremadamente largos y complejos (BUCKSCH, et al, 2008:13). Para llevar a cabo el filtrado y unión de la información en un único modelo se emplea un

software específico de visualización y edición de la base de datos. El programa permite a través de la nube de puntos mostrada, obtener secciones o plantas de manera muy ágil, así como imágenes en perspectiva, ortoimágenes, vídeos, etc.

Los pasos más significativos dentro de esta fase son:

#### *Registro*

Encontrar la posición y rotación del instrumento para cada barrido en un sistema de coordenadas específico. Esto se puede hacer a través de puntos de control o programas de ingeniería inversa.

#### *Limpieza*

Podremos eliminar de forma semiautomática elementos captados y no deseados dentro de nuestra escena, ya que estos pueden llegar a distorsionar los resultados requeridos.

#### *Optimización*

Se trata primero de unificar el modelo en densidad de puntos, para después estructurar y dividir en zonas facilitando así su manejo y comprensión.

#### *Modelado y texturizado*

Por lo general, en todas las aplicaciones de patrimonio cultural, se requiere un modelo poligonal que pueda satisfacer la demanda de representación, pero en algunos casos, la transición de una densa nube de puntos a un modelo poligonal en arquitectura es un proceso complejo, impreciso y laborioso (ROCA-PARDIÑAS et al, 2008:7).

Dentro de las operaciones de modelado podemos destacar:

- Edición de polígonos.
- Correcciones de bordes.
- Reducción del número de polígonos,
- Rellenado de agujeros.
- Edición de superficies enteras.

Todas estas operaciones requieren un conocimiento avanzado de software de modelado 3D, estos programas no mallan de forma correcta ni aún tratando y convirtiendo la nube de puntos de partida en una nube homogénea (GARLAND, et al, 1997).

A estos problemas para obtener un buen mallado se suman otros aspectos negativos como:

- Excesivo tiempo para mallar y editar correctamente formas irregulares.
- Gran reducción de puntos al mallar, provocando una pérdida de información métrica.
- Dificultad en gestionar la malla compuesta de millones de polígonos.
- El coste de los programas comerciales de Ingeniería Inversa.

Ahora bien, superados los distintos obstáculos, y obtenido el modelo en 3D estaremos en condiciones de elaborar cualquier dibujo en formatos más clásicos, como las

plantas, secciones o alzados representados estos tanto en 2D como en 3D, e incluso llegando al detalle piedra a piedra mediante la aplicación de las texturas en la superficie ya creada.

La calidad visual de la imagen, su aspecto (nos referimos a la textura del objeto representado, a la definición de los bordes de los elementos, etc.), depende en gran medida de la fotografía de partida que hemos logrado con el láser escáner 3D y de la intensidad de la nube de puntos.

PROCESO CONCRETO DE TRABAJO

ANTECEDENTES

El levantamiento de alta definición (HDS) de la construcción histórica que mostramos está directamente vinculado a la Universidad de Córdoba y más concretamente al trabajo Fin de Máster “Diseño y Representación en Ingeniería y Arquitectura” dentro del Departamento de Expresión Gráfica en la Ingeniería, donde es catedrático del mismo D. Francisco de Paula Montes Tubío, el cual ejerce como director del presente trabajo.

Además este trabajo está vinculado a los proyectos que desarrolla el Museo Histórico Municipal de Priego de Córdoba, planteándose este registro como el apoyo documental y gráfico al trabajo que desarrolló dicha unidad en los procesos de identificación de la evolución constructiva de los edificios (ver CARMONA, R. et al, 1998; CARMONA, R. et al, 1999; CARMONA, R. et al, 2003), fundamentalmente a través de la lectura estratigráfica de la arqueología, el estudio crítico de las fuentes documentales u otras metodologías específicas de la arqueología de la arquitectura.

El Castillo de Priego<sup>3</sup> y como parte de él la Torre del Homenaje, objeto de nuestro estudio, está declarado Bien de Interés Cultural en su tipología legal de Monumentos [Códigos 14/055/005 y R-I-51-0001134].

La fortificación se ubica dentro de la Zona A de Protección del Patrimonio Arqueológico Urbano, según consta tanto en el Plan Especial de Protección, Reforma Interior y Catálogo del Centro Histórico, aprobado en Pleno Municipal del 4 de Mayo de 2001, como en la Carta Arqueológica de Riesgo [C.A.R.] del municipio.

La Torre del Homenaje (ver CARMONA, R. et al, 1998; CARMONA, R. et al, 1999; CARMONA, R. et al, 2003), o Torre Gorda, se ubica descentrada en el patio del citado castillo. La construcción pertenece al periodo de ocupación de la orden de Calatrava (1246-1327) y está realizada con mampostería de piedra caliza y esquinas reforzadas con sillares. Su altura es considerable, acercándose a los 25 metros (para una planta de unos 187 m²), parte de los cuales son semisubterráneos en la actualidad.

Consta de tres plantas cubiertas con bóvedas de cañón con rosca de ladrillo o lajas de piedra: una inferior, sin acceso original desde el exterior; otra media, que se emplearía como almacén y que recibía una pobre luz natural desde unas grandes aspilleras, hoy sensiblemente aumentadas; y

una superior, identificable como residencia y adornada en sus vanos con cuatro ventanas o ajimeces con doble arco de herradura y columna central con capitel de mocárabes.

La comunicación original entre plantas no es la actual (escalera de caracol de tipo mallorquín) aunque hay evidencias de su ubicación por los pasos de entresuelo, abovedados en ladrillo, conservados en la esquina oeste. El acceso original de la torre, mediante vano dovelado de medio punto y pasillo abovedado, se situaba a la altura de la planta mediana, varios metros sobre el nivel del suelo primitivo, para facilitar la defensa de la construcción.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LA CONSECUCCIÓN DE OBJETIVOS

Como punto de partida, un reto, documentar y divulgar uno de los monumentos arquitectónicos más significativos de Priego de Córdoba: la Torre del Homenaje. El objetivo es establecer un vínculo entre la metodología del instrumento y las posibilidades del objeto en estudio, por lo tanto se sabía que el análisis antes de acometer los trabajos, tanto en campo como en gabinete, sería fundamental a la hora de obtener los resultados (Fig. 1).

Como primer objetivo nos proponemos realizar una planificación previa a la captura de datos en campo con el

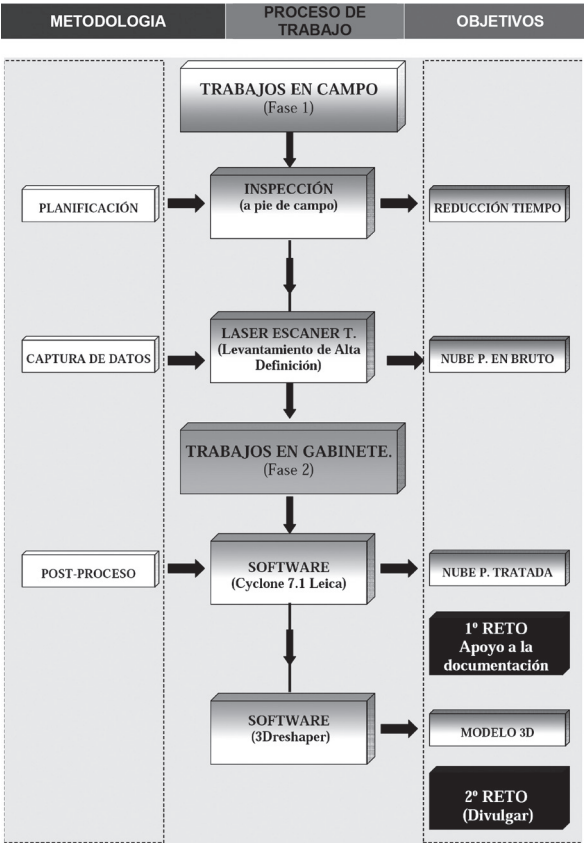


Fig.1: Esquema de flujo de trabajo relacionando metodología y objetivos.

3) El Castillo de Priego se localiza dentro del actual casco urbano de la ciudad, incluido en los límites del Conjunto Histórico del barrio de la Villa. Su disposición topográfica, que mantiene la misma cota que su entorno urbano más próximo, hace de la fortificación un edificio conexasión a la población, integrado en ella, como digna heredera de sus orígenes como alcazaba islámica de la medina del Priego andalusí.

propósito de reducir los posibles problemas que puedan surgir durante dichos trabajos: se discute la correcta distribución de posiciones, la resolución de captura, el proceso en la toma de imágenes digitales... siempre para obtener un registro del monumento lo más preciso posible.

En la búsqueda del segundo objetivo, dentro de los trabajos de gabinete, nos planteamos obtener una nube de puntos milimétrica, analizarla, limpiarla y optimizarla con el propósito de obtener una nube organizada, y sin ruido, ya que la representación deseada será un modelo poligonal 3D con resolución piedra-piedra, tanto para las zonas exteriores como interiores de la torre, y así generar como resultado final aquella visualización que satisfaga la demanda en el ámbito Arquitectónico.

La metodología empleada consta de dos fases: toma de datos en campo y procesamiento de información en gabinete.

Fase I: Toma de datos en campo (TDC)

La toma de datos en campo la realizaremos en base a un buen estudio y una correcta planificación con el fin de satisfacer nuestro objetivo de representación, como sabemos el detalle piedra a piedra de todo el monumento. Como consecuencia la densidad final de la nube de puntos optimizada tendría que ser de 1cm; por lo tanto, la resolución de captura para cada escaneo en el caso más desfavorable debería estar por debajo de este valor, ya que existen factores que intervienen en la captura de datos que no garantizan la resolución configurada en el láser escáner 3D. Nuestro procedimiento una vez acotada la superficie a escanear fue seleccionar el punto más alejado de esta, y establecer un valor entre 1 y 0.5 cm.

La resolución y otras características técnicas que posee nuestro láser escáner 3D como velocidad y alcance

afectarán al tiempo resultante de cada escaneo, aunque este valor es importante no debemos de olvidar que la prioridad es asegurar una toma de datos apropiada y de alta calidad (Tab. 1).

Como hemos visto en la tabla anterior los posicionamientos del láser escáner 3D, en nuestro proyecto se realizaron en base, a 2 zonas: exterior e interior del edificio.

Zona exterior de la torre

Para realizar el levantamiento de alta definición en el exterior es necesario conocer el aspecto y forma del objeto a escanear. La torre tiene forma de prisma rectangular de (15,33 x 11,92 metros) en la base y una altura aproximada de 25 metros, respecto al nivel del suelo. Sabemos que una fase importante y delicada del trabajo de campo radica en la correcta posición del láser escáner 3D, puesto que de ellos dependerá la calidad de la nube de puntos obtenida en la citada zona.

Planificación:

La planificación comienza con una inspección visual en campo con ayuda de planos de plantas, alzados y secciones que nos proporciona el Museo Histórico Municipal a través del Servicio Municipal de Arqueología. Una vez allí realizamos un recorrido sobre el objeto y vemos cuáles pueden ser las posiciones del láser escáner 3D más óptimas en nuestro proyecto. Para ello tendremos en cuenta la geometría del monumento a registrar, y las posibilidades que nos brinda el entorno, en nuestro caso una muralla transitable del castillo que rodea a la torre en un 75% (Fig. 2).

Los primeros datos que nos proporcionó la geometría de la torre fueron las distintas escalas a emplear: 1:100 y 1:200 para plantas, secciones y alzados para una posible representación 2D.

Con respecto a los obstáculos no se aprecian elementos que puedan entorpecer las distintas capturas. Inevitablemente no estaremos exentos de que interfieran en la captura personas, cables y pájaros (estos últimos habitan en gran cantidad en el exterior e interior del monumento), por lo tanto será muy probable que generen ruido en la futura nube de puntos.

Captura de datos

Los criterios tenidos en cuenta en los posicionamientos en el exterior de la torre:

- Las posiciones van a estar condicionadas por la necesidad de capturar un mínimo de tres dianas por escaneo; además, tendremos en cuenta que desde el siguiente escaneo se han de visualizar estas tres u otras que previamente se hayan escaneado, para así establecer las relaciones necesarias para

EXTERIOR DE LA TORRE DEL HOMENAJE				
DATOS DE POSICIONAMIENTO				
POSICIÓN	FECHA	HORA	TIEMPO TOTAL	RESOLUCIÓN (mm.)
Station-001	05.07.2011	8:57:12	2:05:44	3
Station-002	05.07.2011	11:02:56	1:39:15	5
Station-003	05.07.2011	12:42:11	1:32:31	7
Station-004	06.07.2011	14:14:42	1:44:25	3
Station-005	06.07.2011	16:53:07	1:14:36	3
Station-006	06.07.2011	18:07:43	1:02:04	7
Station-007	07.07.2011	9:54:51	0:50:54	7
Station-008	07.07.2011	11:10:45	1:05:39	5
8			11:15:08	
INTERIOR DE LA TORRE DEL HOMENAJE				
DATOS DE POSICIONAMIENTO				
POSICIÓN	FECHA	HORA	TIEMPO TOTAL	RESOLUCIÓN (m)
Station-009	07.07.2011	12:56:24	0:34:52	20
Station-010	07.07.2011	13:51:16	0:40:43	10
Station-011	07.07.2011	14:31:59	0:45:47	10
Station-012	08.07.2011	15:37:46	0:38:46	10
Station-013	08.07.2011	16:16:32	0:59:27	10
Station-014	08.07.2011	17:15:59	0:56:49	5
Station-015	08.07.2011	18:12:48	0:40:07	10
Station-016	08.07.2011	18:52:55	0:45:13	5
8			6:01:44	

Tabla nº1: Datos de posicionamientos tanto en el exterior como en el interior de la TH relacionando tiempos con resolución de captura.



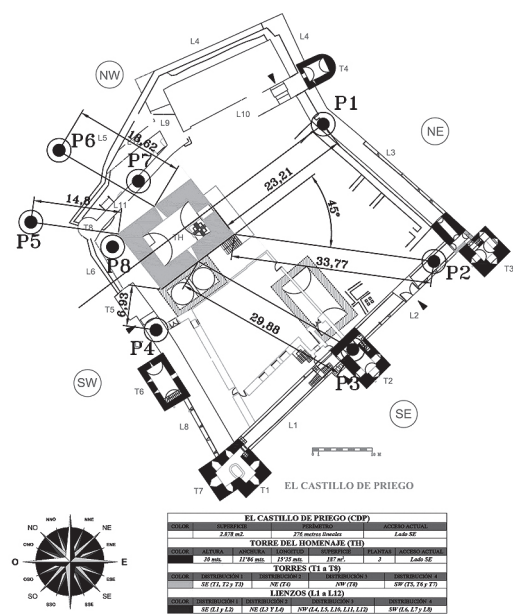


Fig. 2: Vista en planta de la TH dentro del Castillo de Priego, así como las distintas posiciones del láser escáner 3D.

- la obtención de un único sistema de coordenadas y un único modelo de nube de puntos.
- La posición ideal es el equilibrio entre una superficie de captura lo más perpendicular posible al láser escáner 3D, la mínima distancia al objeto dentro de su alcance y las posibilidades del entorno. Al intentar alejarnos del elemento a escanear este ángulo se reduce, pero interviene negativamente otro factor, la distancia, ya que tampoco es recomendable alejarse en exceso (Fig. 2).
  - Se deben tomar las fotografías con la máxima resolución en píxel que permitan las cámaras fotográficas utilizadas, con objeto de obtener mayor nitidez y definición necesarias para la posterior asignación de puntos. En el caso de posicionamientos lejanos las fotos pueden resultar inservibles ya que al buscar la resolución milimétrica a ese nivel de detalle al texturizar puede pixelarse.

Resultados

Una vez observadas estas características y tenidas en cuenta las consideraciones se decide realizar un escaneo por cara y perpendicularmente a estas, a una altura media con respecto a la altura total de la torre. El escaneo se realizó en un 75% condicionado por la altura de la muralla perimetral, el resto se realizó desde las terrazas de la vecindad limítrofe. Como refuerzo para dar mayor intensidad a la nube de puntos se realizaron 4 escaneos más en las zonas de las esquinas. Por lo tanto las posiciones del láser escáner 3D para la captura del exterior de la torre estarán determinadas por un total de 8 escaneos, como apunte destacaremos que estos se realizaron de forma consecutiva.

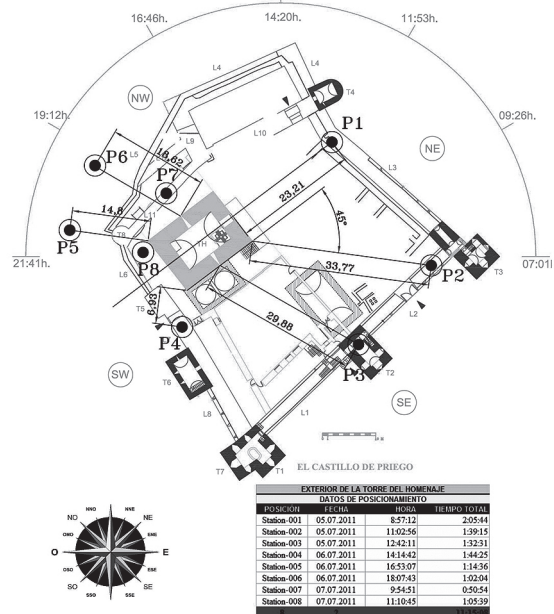


Fig. 3: Vista en planta de la TH dentro del Castillo de Priego, así como las distintas posiciones del TLS relacionadas con la salida y puesta de sol.

En el inicio de los escaneos, se tuvieron en cuenta no sólo las condiciones climáticas sino también la hora de salida del sol, para evitar que este generase ruido (tanto por exceso como por contrastes de luz) (Fig. 3). Debemos recordar que las imágenes son tomadas desde la cámara interna del láser escáner 3D, por lo tanto el resultado podrían ser fotos muy blancas por efecto de la sobreexposición; de forma contraria también podríamos obtener imágenes muy contrastadas al intervenir en la misma superficie la sombra y el sol.

Para el levantamiento de los 1.365 metros cuadrados de fachada (4 caras de la torre) fueron necesarios 3 días de campaña con un total de 8 posiciones y más de 2.400 fotos de 4Mp. La distancia elegida entre cada posición varió desde casi los 40 metros hasta los 4 metros. Estas distancias cortas se emplearon en zonas de apoyo por falta de visibilidad desde la muralla (posición de escaneo 7 y 8), con una resolución angular de 0,08°. El tiempo de escaneo varió desde los 50 minutos a 125 minutos dependiendo de la gama de exploración por la visibilidad de las zonas y la resolución (Tab. 2).

No obstante cabe destacar la gran variedad en la tipología de estos elementos. El análisis que realizamos nos proporcionó datos sobre el tiempo de su escaneo dependiendo del tipo. La siguiente tabla muestra los datos obtenidos (Fig. 5).

Podemos observar en la anterior gráfica que las diferencias entre el tipo de diana y el tiempo empleado en el escaneo son casi inapreciables. Por lo tanto no influye el tipo de diana con la duración de su escaneo.

En nuestro caso las posiciones, relación ángulo de captura con la superficie escaneada, en el mejor de los casos fue de 90° y en el caso más desfavorable fue de 45°.

EXTERIOR DE LA TORRE DEL HOMENAJE								
DATOS DE POSICIONAMIENTO					RESOLUCIÓN		FOTOS	
POSICIÓN	FECHA	HORA	TIEMPO T.	Nº DIANAS	DISTANCIAS	(mm.)	PUNTOS	MB.
Station-001	05.07.2011	8:57:12	2:05:44	6	24 m.	3	48.555.257	186
Station-002	05.07.2011	11:02:56	1:39:15	4	37 m.	5	32.077.371	137
Station-003	05.07.2011	12:42:11	1:32:31	7	30 m.	7	26.799.017	915
Station-004	06.07.2011	14:14:42	1:44:25	4	24 m.	3	48.350.666	320
Station-005	06.07.2011	16:53:07	1:14:36	5	15 m.	3	29.501.474	158
Station-006	06.07.2011	18:07:43	1:02:04	3	19 m.	7	12.618.164	158
Station-007	07.07.2011	9:54:51	0:50:54	6	5 m.	7	14.266.929	291
Station-008	07.07.2011	11:10:45	1:05:39	3	2 m.	5	29.142.884	302
8	2		11:15:08	38			241.311.762	2.467

Tabla nº 2: Resultados en los 8 posicionamientos del exterior de la torre.

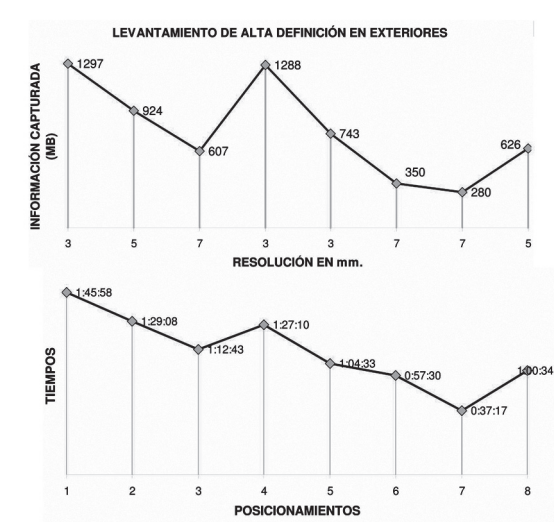


Fig. 4: Gráfica que relaciona cada posición del exterior con la resolución utilizada y la relación existente entre el tiempo de escaneo.

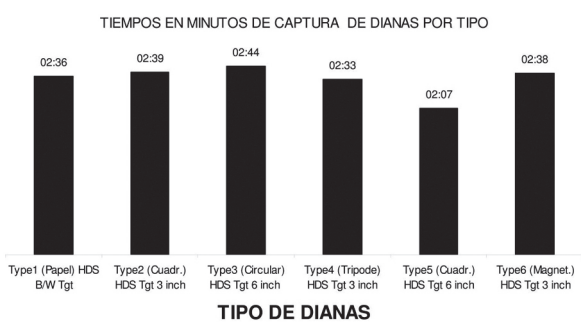


Fig. 5: Relación entre tiempo de escaneo y tipos de dianas.

En relación al suministro de energía, utilizamos las baterías internas del láser escáner 3D. Estas no fueron un inconveniente ya que existían tomas de corriente en la misma torre para la recarga de estas.

Finalizado el levantamiento de alta definición en el exterior de la torre, procedemos a introducirnos en el interior de esta, utilizando el mismo proceso descrito en el caso anterior.

Zona interior de la torre:

Para realizar el levantamiento de alta definición en la zona interior es preciso determinar las características geométricas del objeto a escanear. La zona interior de la torre consta de tres plantas cubiertas con bóvedas de cañón: una inferior denominada P1, desde donde actualmente accedemos al interior; otra media, en adelante P2, y una superior, identificable como P3 (Fig. 6).

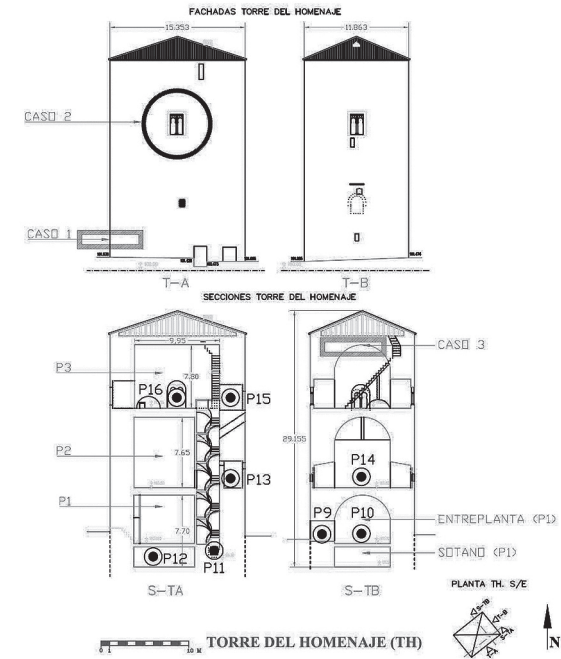


Fig. 6: Alzados y secciones. de la TH con los posicionamientos del TLS en el interior (P9-P16).

Planificación

La comunicación original entre plantas no es la actual (escalera de caracol de tipo mallorquín), precisamente por ese motivo decidimos prescindir en la captura de datos de la actual escalera. Donde sí mostramos gran interés es en la P1 ya que aunque sin acceso y con función de aljibe originariamente, en la actualidad esta subdividida por una entreplanta por donde accedemos a la torre; a primera vista es difícil tener constancia del volumen original.

El mayor tiempo de la inspección visual del interior lo concentramos en la planta P1, como sabemos subdividida

por una entreplanta superior y otra inferior. Esta última se compone de un conjunto de pilastras que funcionan como elemento estructural de la entreplanta superior. En nuestra primera observación se aprecia la presencia de infinidad de obstáculos para el registro de toda la superficie; no obstante, nos centraremos en capturar la bóveda dentro de la entreplanta superior, y los límites que componen el contorno de la entreplanta inferior para así poder verificar los indicios de una única planta P1 ocupando el mismo volumen que las restantes plantas P2 y P3.

Interesaba de partida obtener un registro donde se pudiesen comprobar cómo eran originariamente las distintas partes del edificio y documentar cómo se vinculaban estas entre sí (CARMONA, R. et al, 2003). La presencia de la entreplanta hizo que nos planteásemos situar el láser escáner 3D en 4 posiciones entre las dos zonas de la P1 para obtener todo el volumen de dicha planta. En total, teniendo en cuenta que en las plantas P2 y P3 son diáfanas y con ausencia de recovecos, lo normal es que se prevean 2 posicionamientos en el interior de cada planta. Por lo tanto el total de escaneos en el interior de la torre podría ascender a 8 (4 escaneos en la P1, 2 en la P2 y 2 más en la P3).

Captura de datos

Los criterios tenidos en cuenta en los posicionamientos en el interior de la torre:

- En zonas interiores donde sea necesario capturar todo el volumen los escaneos se han de realizar a bóveda completa, por lo tanto la posición ideal es en el centro de la planta.
- Los posicionamientos interiores también necesitan un mínimo de tres dianas por escaneo, relacionadas estas con sus tres equivalentes tanto en el exterior como en el sucesivo escaneo interior, para así establecer las relaciones necesarias para la obtención de un único sistema de coordenadas y un único modelo de nube de puntos.
- Se deben tomar las fotografías con la máxima resolución en píxel que permitan las cámaras fotográficas utilizadas, con objeto de obtener mayor nitidez y definición necesarias para la posterior asignación de puntos.

Resultados:

Realizamos los escaneos en las horas donde fuese más molesto el sol, ya que en el interior este aspecto no es un inconveniente.

Debido a la necesidad de relacionar los escaneos interiores con el exterior, establecimos 2 posiciones del aparato en el interior tanto de la planta P2 como de la P3, con lo que además, al combinar ambas posiciones, conseguimos ampliar la información volumétrica de la planta.

En la planta P1 destacamos el acceso a la planta soterrada, se hace por medio de unas escaleras y el espacio frente a él es estrecho, por lo que en esta zona se necesitó posicionar el aparato en 2 sitios. Se evitaron al máximo los obstáculos y mobiliario existente en la entreplanta superior ya que nuestro registro se centro en la bóveda y esta se capturo sin ningún problema con 1 escaneo, de la misma manera en la entreplanta inferior el propósito fue captar las paredes limítrofes ya que este si era un requisito indispensable para obtener el volumen originario.

En total para el levantamiento del interior del edificio (P3, P2 y P1 esta última subdividida en 2 entreplantas) fueron necesarios 2 días de campaña con un total de 8 posiciones y más de 7.000 fotos de 4Mp. La resolución angular de 0,08°. El tiempo de escaneo varía desde los 34 minutos a 59 minutos dependiendo de la gama de exploración y la visibilidad de las zonas de interés (Tab. 3).

Como hemos podido comprobar en la tabla, la resolución de la captura de puntos fue igual, en la mayoría de escaneos del interior de la torre (resolución media 10 mm.), adquiriendo entre las dos posiciones un total de

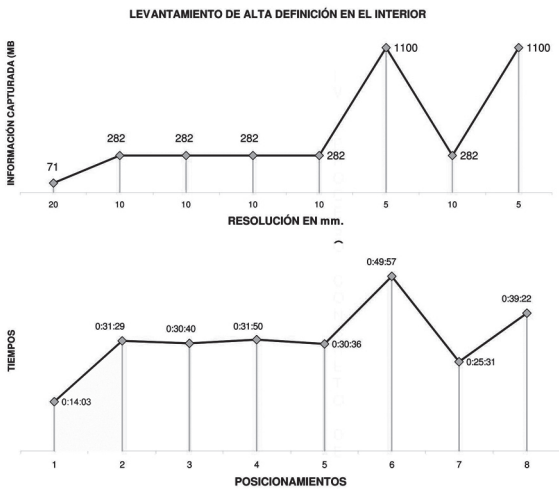


Fig. 7: Posiciones del interior con su correspondiente resolución y la relación de esta con la duración de cada escaneo.

INTERIOR DE LA TORRE DEL HOMENAJE								
DATOS DE POSICIONAMIENTO					RESOLUCIÓN		FOTOS	
POSICIÓN	FECHA	HORA	TIEMPO TOTAL	Nº DIANAS	DISTANCIAS	mm.	PUNTOS	MB.
Station-009	07.07.2011	12:56:24	0:34:52	7	10 m.	20	3.574.831	914
Station-010	07.07.2011	13:51:16	0:40:43	4	10 m.	10	14.792.240	914
Station-011	07.07.2011	14:31:59	0:45:47	6	10 m.	10	14.800.155	914
Station-012	08.07.2011	15:37:46	0:38:46	3	10 m.	10	14.800.155	914
Station-013	08.07.2011	16:16:32	0:59:27	7	10 m.	10	14.491.011	914
Station-014	08.07.2011	17:15:59	0:56:49	3	10 m.	5	59.079.500	914
Station-015	08.07.2011	18:12:48	0:40:07	6	10 m.	10	14.621.603	914
Station-016	08.07.2011	18:52:55	0:45:13	3	10 m.	5	58.811.706	914
8	2		6:01:44	39			194.971.201	7.312

Tabla nº 3: Resultados en los 8 posicionamientos del interior de la torre.



194,88 millones de puntos. Se emplearon en este proceso de captura de datos un total de 6 horas, incluyendo el posicionamiento del aparato, la captura de puntos a máxima densidad y el registro de las dianas de control que ha permitido unir con precisión ambos escaneos (Fig. 7).

4. Segunda fase: Procesado de datos en gabinete (PDG)

Tras haber realizado nuestro primer trabajo en campo, como resultado obtuvimos una base de datos formada principalmente por imágenes y nubes de puntos. Un archivo con extensión (.imp) con posibilidades de edición y visualización con el software *Leica Cyclone*.

La consecución del primer objetivo aún no se había logrado, la obtención de la base de datos del monumento en estudio, no era suficiente. Esta información se ha de tratar y pasar de ser una base de datos en bruto a una base de datos tratada. Este aspecto lo conseguiremos a través del post-proceso: registro, limpieza y optimización serán los factores que intervengan en la consecución de nuestro primer reto.

Recordemos que no acabaría aquí nuestro trabajo: este trabajo no pasa sólo por tener un archivo histórico del citado monumento, como apoyo a la documentación, sino que se centra en la búsqueda de un modelo tridimensional homogéneo en resolución, a través del modelado-texturizado para darle el carácter divulgativo que se pretendía originariamente.

4.1. Consecución del 1º reto: base de datos como apoyo a la documentación

Como sabemos la tecnología del láser escáner 3D nos proporciona una distribución de puntos medidos sobre la superficie del objeto, además con información de color en los puntos. No obstante, la representación de esta nube de puntos en bruto no resulta atractiva generalmente. Esta carencia visual es causada por la falta de concreción del elemento en estudio y por la existencia de ruido o residuos. Aunque se puede usar en algunos casos nosotros consideramos recomendable su tratamiento. Para ello existen visualizadores dentro de distintos programas de CAD como por ejemplo el *Pointcloud* y el *Cloudworx* entre otros, pero se necesitan ordenadores potentes para mover de una manera eficiente una gran cantidad de puntos. Nosotros emplearemos el software *Leica Cyclone 7.1*. ya que este programa puede manipular en tiempo real y de forma eficiente modelos 3D con gran volumen de puntos, importante este dato, por la envergadura real de nuestro proyecto que oscila entre 400-450 millones de puntos.

Posteriormente nos planteamos como abordar nuestra base de datos en bruto (.imp). Como dato significativo, sabemos que al objeto en estudio se le practicaron varias tomas con el láser escáner 3D en campo, y por consiguiente dieron lugar a varias nubes de puntos, con la posibilidad de fusionar estas

como nos resulte conveniente, bien por zonas o mediante una única nube.

En esta investigación, con la finalidad de agilizar el trabajo realizamos el registro, afrontando primero los trabajos en el interior de la torre y posteriormente en el exterior de ella.

Zona interior de la torre

Una vez localizada la base de datos dentro de lo que en adelante será nuestra herramienta de trabajo (el ordenador personal), desarrollaremos la línea de investigación de la siguiente forma:

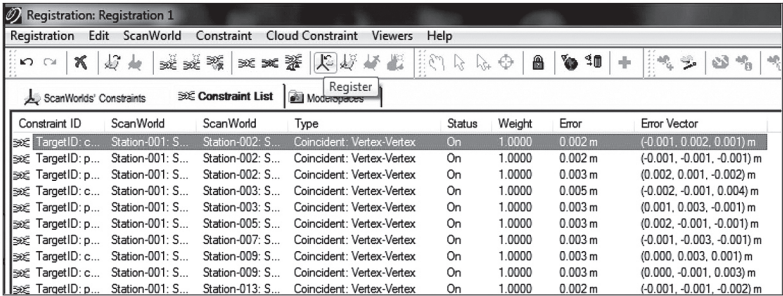
Registro

Los requisitos que debe cumplir el registro dependerán de lo que queramos visualizar y el uso que se va a hacer del mismo. Si sólo queremos visualizar el modelo desde la posición en la que estaba el láser escáner 3D nos bastará con la nube de puntos tomada desde esa posición. El proceso de registro, aplicado a nuestra base de datos se realizo con el software *Leica Cyclone V7.1* y consistió en seleccionar los escaneos que afectan al interior de nuestro edificio (8 distribuidos a lo largo de todas sus plantas).

Como datos significativos decidiremos a qué posicionamiento del láser escáner 3D asignaremos el único sistema de referencia, desde donde a partir de ahora todos los puntos quedaran referenciados al nuevo origen. Por lo tanto la decisión fue fácil, como es lógico lo asignaremos en el posicionamiento más bajo con el propósito de reducir puntos con cotas negativas. En nuestro caso el posicionamiento 12 que se corresponde con el escaneo de la entreplanta inferior de la P1.

El proceso en sí, se identificará dependiendo de la zona en estudio, lo nombraremos como (*Registration\_interior*) y puede resultar manual o automático. En nuestro caso resultó automático y consecuentemente fácil ya que los puntos de control o dianas se escanearon en cada posición adecuadamente, con un error asumible dentro del citado programa (Fig 8).

Este proceso lleva implícito la creación de un *ScanWorld\_interior* que define la posición del láser escáner 3D para el nuevo registro. Asociado a este crearemos su particular *ModelSpace\_interior* con la finalidad de visualizar el resultado de la nube de puntos del interior de la torre ya como único elemento.



Constraint ID	ScanWorld	Station	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
TargetID: c...	Station-001: S...	Station-002: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, 0.002, -0.001) m
TargetID: p...	Station-001: S...	Station-002: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(-0.001, -0.001, -0.001) m
TargetID: p...	Station-001: S...	Station-002: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.002, 0.001, -0.002) m
TargetID: c...	Station-001: S...	Station-003: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.005 m	(-0.002, -0.001, 0.004) m
TargetID: p...	Station-001: S...	Station-003: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(-0.001, 0.003, -0.001) m
TargetID: p...	Station-001: S...	Station-005: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.002, -0.001, -0.001) m
TargetID: p...	Station-001: S...	Station-007: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(-0.001, -0.003, -0.001) m
TargetID: c...	Station-001: S...	Station-009: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.000, 0.003, 0.001) m
TargetID: c...	Station-001: S...	Station-009: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.000, -0.001, 0.003) m
TargetID: p...	Station-001: S...	Station-013: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, -0.001, -0.002) m

Fig. 8: Dianas de control (tgt) que intervienen en el registro interior y su correspondiente error.

Limpieza

Como hemos visto en el apartado anterior tras la visualización en el particular *ModelSpace\_interior* estaremos en condiciones de acometer el proceso de limpieza, eliminando de forma semiautomática elementos captados y no deseados dentro de nuestra escena, ya que estos pueden llegar a distorsionar los resultados requeridos.

Existen varias herramientas que nos permite realizar este proceso. En la mayoría de las ocasiones hemos hecho uso de los cercanos o *fence*: con distintas formas 2D seleccionamos los elementos no deseados dentro de nuestra escena, así como de forma contraria los sí deseados y proceder según nos interese a eliminar lo que esta dentro (*delete inside*) o fuera de lo marcado (*delete offside*).

Un aspecto importante a destacar de esta fase son las propiedades reflectantes de las superficies escaneadas. Los parámetros que afectan y determinan la fuerza de la señal de retorno que recoge el láser escáner 3D, pueden servir para identificar los distintos elementos que constituyen nuestra escena y en el caso de que estos no sean deseados procederemos a su eliminación.

Cabe destacar, en la fase experimental la aplicación de estas propiedades en el presente trabajo. Para nosotros, detectar un elemento que no perteneciese al objeto en estudio por su material y textura era un reto. Como ejemplo visualizamos la silueta de pájaros que habitan en la torre, captada con el láser escáner 3D, durante el proceso de toma de datos (Fig. 9).

Optimización

Para ponernos en situación este será el último paso antes de obtener la base de datos con la información para la documentación de nuestro objeto de estudio. La optimización finalmente dotará a nuestra nube de puntos de homogeneidad, rapidez y eficacia ante cualquier consulta. El modelo obtenido se estructurará y dividirá en partes para facilitar su manejo y comprensión.

En esta fase destacamos entre otras funciones la de segmentar la nube de puntos (*Segment Cloud*) y la de unificar (*Unify Clouds*).

Es a través de la segmentación (*Segment Cloud*) cuando realizamos distintos cortes al objeto en estudio para analizar zonas por separado y estudiar independientemente su comportamiento. La aplicación en nuestro trabajo la realizaremos segmentando las plantas con planos horizontales en 2 partes por planta, realizando en todo el interior

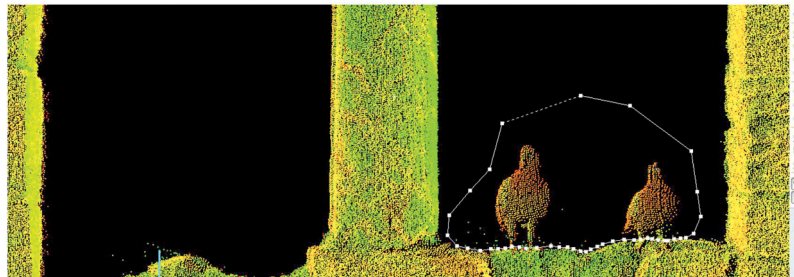


Fig. 9: Ruido o residuos provocados por la existencia de pájaros que habitan en el interior de la TH.

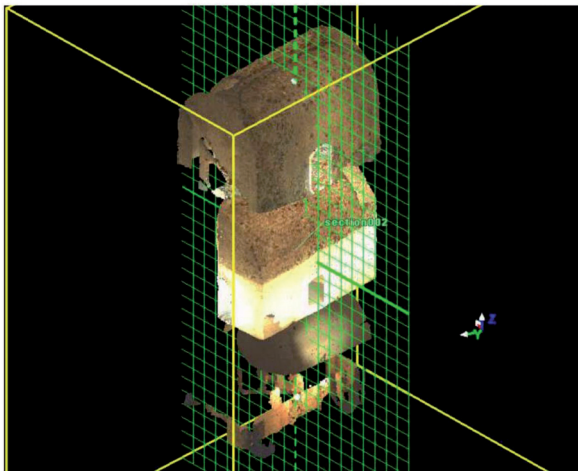


Fig.10: Vista en perspectiva tanto del contorno de la P1, como el volumen cerrado de la P2 y P3.

un total de 6 secciones, con el propósito de visualizar elementos de su interior (Fig. 10).

Respecto a la segunda función, unificar la nube de puntos (*Unify Clouds*), aplicaremos la densidad promedio de la nube de puntos elegida, dotándola de homogeneidad. En la zona interior será de 1cm. que corresponde al valor medio de resolución en el interior de las plantas.

Zona exterior de la torre

De la misma manera que en el punto anterior, en la zona exterior, desarrollaremos la línea de trabajo de la siguiente forma:

Registro

El proceso de registro como sabemos, tiene como principal característica decidir a que posicionamiento del láser escáner 3D asignaremos el nuevo origen como único sistema de referencia de todo el exterior del edificio. En el exterior tendremos en cuenta que para poder tener el mismo sistema de referencia que se uso en el interior necesitamos incluir en el registro el escaneo objeto de la primera asignación. Recordemos que para la zona interior el posicionamiento 12 se correspondía con el escaneo de cota más baja de todo el trabajo de campo.

Los requisitos que debe cumplir el registro en el exterior del edificio afectarán a las zonas exteriores que queramos visualizar y al uso que hagamos de estas posteriormente. Nuestro propósito era visualizar todo el volumen del edificio, por lo tanto procedimos a realizar el registro para todos los escaneos que intervinieron en el exterior (8 distribuidos a lo largo de todo el perímetro del edificio y 1 más que se corresponde con el escaneo interior que se usó para referenciar). En total 9 escaneos componen el registro en el exterior del edificio. Al igual que en el caso anterior el proceso de registro en el exterior, se realizo con el software *Leica Cyclone V7.1* (Fig. 11).

Registration: Registration 1							
Registration Edit ScanWorld Constraint Cloud Constraint Viewers Help							
ScanWorlds' Constraints SKE Constraint List Register							
Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
SKE TargetID: c...	Station-001: S...	Station-002: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, 0.002, 0.001) m
SKE TargetID: p...	Station-001: S...	Station-002: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, -0.001, -0.001) m
SKE TargetID: p...	Station-001: S...	Station-002: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.002, 0.001, -0.002) m
SKE TargetID: c...	Station-001: S...	Station-003: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.005 m	(-0.002, -0.001, 0.004) m
SKE TargetID: p...	Station-001: S...	Station-003: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.001, 0.003, -0.001) m
SKE TargetID: p...	Station-001: S...	Station-005: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.002, -0.001, -0.001) m
SKE TargetID: p...	Station-001: S...	Station-007: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(-0.001, -0.003, -0.001) m
SKE TargetID: c...	Station-001: S...	Station-009: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.000, 0.003, 0.001) m
SKE TargetID: c...	Station-001: S...	Station-009: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.000, -0.001, 0.003) m
SKE TargetID: p...	Station-001: S...	Station-013: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, -0.001, -0.002) m
SKE TargetID: c...	Station-001: S...	Station-017: S...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.006 m	(0.001, 0.006, 0.001) m

Fig.11: Elementos de control que intervienen en el registro exterior y su correspondiente error.

Limpieza

Como hemos visto en el apartado anterior, tras la visualización en el particular *ModelSpace* procederemos igualmente al uso de los cercanos o *fence*, con la finalidad de seleccionar y eliminar todos los elementos no deseados en la zona exterior.

Cabe destacar en esta zona la existencia de tendido eléctrico sobre la superficie de la fachada de la torre. La presencia de este se distingue por su color, por lo que resulta mucho más fácil su eliminación de la escena.

Optimización

La segmentación (*Segment Cloud*) realizada en el exterior se llevo a cabo dividiendo la torre con planos horizontales en 13 partes, valor que corresponde al seccionar la torre en intervalos de 2 metros .

En la unificación (*Unify Clouds*) realizada en el exterior se aplicó una densidad promedio de la nube de puntos de 5 mm, que corresponde al valor medio de resolución en el exterior del edificio.

4.2. Consecución del 2º reto: base de datos para la divulgación

Una vez que la base de datos pasa de ser una nube de puntos en bruto a una nube de puntos registrada, limpiada y optimizada será posible triangularla y crear una malla que represente las superficies del elemento objeto de estudio. Por lo general, en todas las aplicaciones de patrimonio cultural, se requiere un modelo poligonal que pueda satisfacer la demanda de representación, pero en algunos casos, la transición de una densa nubes de puntos a un modelo poligonal en arquitectura es un proceso complejo, impreciso y laborioso.

La primera cuestión a considerar fue la utilización de un nuevo programa informático, el *3DReshaper*. Su uso fue necesario para conseguir el mallado, ya que el utilizado hasta ahora *Leica Cyclone V7.1*, para este proceso no cumplía todos los requisitos buscados. Por lo tanto mediante la función exportar, la nueva base de datos generó un archivo con extensión (.pts) con posibilidades de edición y visualización dentro

del nuevo software. La incorporación al proceso de trabajo del *3DReshaper* aporta como ventaja no sólo pasar de una nube de puntos (de mayor o menor densidad) a una superficie mallada, sino que además posibilita la unión de varias nubes de puntos, así como la edición para mejorar o completar la superficie de trabajo. Por último destacaremos la perfecta asociación entre ambos programas (*3DReshaper* y *Leica Cyclone*) ya que permite aportar como textura la superficie original que fue captada con la cámara interna del láser escáner 3D de Leica, completando así

el objetivo buscado.

Los requerimientos de calidad necesitados en nuestro proyecto para el tratamiento del modelo 3D obtenido, necesitó de un hardware muy potente, ya que al inicio hubo que repetir algunas fases por saturación del sistema al intentar modelar de una vez todo el edificio. Esto se pudo solucionar dividiendo el elemento objeto de estudio en exterior e interior y además como esto no fue suficiente decidimos actuar sobre aquellos detalles que eran representativos de cada una de las citadas zonas.

Zona exterior de la torre

Los elementos más significativos elegidos:

- Los muros que componen la fachada sur constituidos generalmente por mampostería de piedra caliza, con esquinas reforzadas con sillares.
- Las cuatro ventanas o ajimeces con doble arco de herradura y columna central con capitel de mocárabes.

Ambos elementos determinarán la resolución de modelado en todo el exterior. La resolución la utilizaremos como medida habitual de nuestro modelo digital. En este contexto se entiende por resolución la distancia entre muestras consecutivas, que sirve para determinar la percepción visual que tendrá nuestro objeto. Por lo tanto el procedimiento que se repetirá será la asignación de distintas resoluciones al mismo elemento con el objetivo de determinar a que resolución se realiza el mallado de toda la superficie restante.

Caso 1. Muros de la Fachada Sur.

Según nuestro criterio el proceso para abordar el

EXTERIOR DE LA TORRE DEL HOMENAJE				
POSICIONAMIENTO			RESOLUCIÓN	
POSICIÓN	FECHA	(mm.)	SUPERFICIE (H X V)	PUNTOS
Station-001	05.07.2011	3	(8478 x 7651)	48.555.257
Station-002	05.07.2011	5	(7458 x 5657)	32.077.371
Station-003	05.07.2011	7	(6781 x 4700)	26.799.017
Station-004	06.07.2011	3	(9244 x 6973)	48.350.666
Station-005	06.07.2011	3	(6752 x 5775)	29.501.474
Station-006	06.07.2011	7	(4336 x 3381)	12.618.164
Station-007	07.07.2011	7	(3189 x 4616)	14.266.929
Station-008	07.07.2011	5	(6643 x 4948)	29.142.884
8	2		R. media 5mm.	241.311.762

Tabla nº 4: Datos de resolución del exterior de la torre; a la resolución media le corresponde un valor de 5mm.



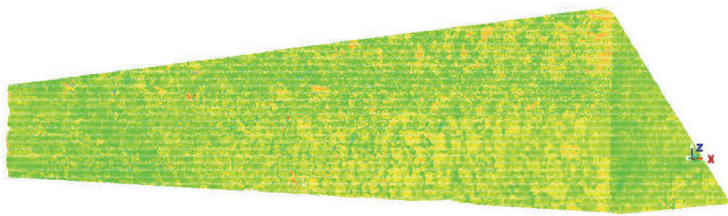


Fig. 12: Nube de puntos preparada para exportar con Leica Cyclone de los muros de la fachada sur (Caso 1).

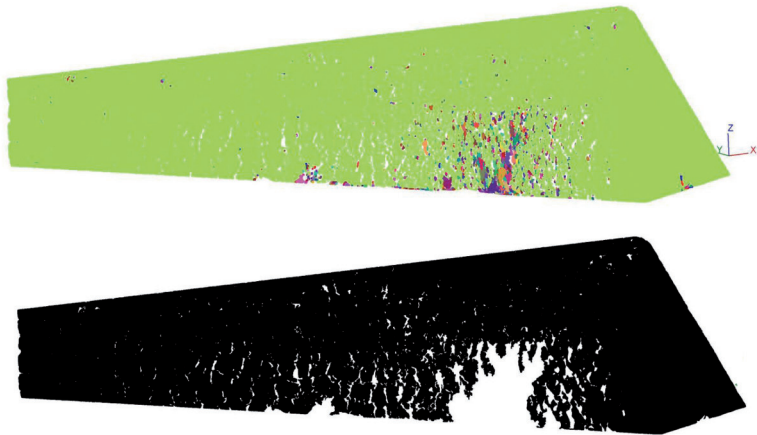


Fig. 13: Filtro a 0,5cm. de separación entre puntos, aplicado al muro de la fachada sur (Caso1).

análisis consistió en utilizar como dato de partida el valor de la resolución media (Tab. 4), que para nuestro caso fue 0,5cm (este valor fue obtenido al sumar las resoluciones configuradas en campo entre el número de escaneos realizados 8 en total) y progresivamente ir diezmando la malla poligonal hasta llegar a 5cm pasando previamente por los puntos intermedios de 1cm y 2,5cm.

Desde *Leica Cyclone* y una vez establecidas las distintas resoluciones, exportamos de la base de datos en bruto una nube de puntos de la zona de estudio (detalle de los muros de la fachada sur) y con el propósito de homogeneizar filtramos la citada nube de puntos aplicando densidades promedio con las resoluciones antes establecidas (Fig. 12).

La operación de filtrar la realizamos con *3DReshaper*. Esta operación consiste en zonificar la nube de puntos mediante colores en función de la densidad establecida.

Como ejemplo observamos en las siguientes imágenes que a mayor resolución mayor número de puntos no cumplen el requisito establecido. Para el caso de 0,5cm el color verde representa

aquellas zonas donde si se cumple la densidad de puntos establecida, como consecuencia en la zona que no exista dicho criterio no se generará la malla (Fig. 13).

Como predecíamos anteriormente el resultado es evidente: a 0,5cm se constituye una malla discontinua, pero como ventaja se obtiene mejor percepción en los objetos que componen el elemento, mientras que a resolución de 2,5cm la malla es completamente continua pero presenta el inconveniente de menor percepción.

En el caso contrario, al realizar el filtro a 2,5cm vemos que predomina el color azul repartiéndose de forma más homogénea por toda la superficie y como consecuencia habrá menos oquedades. (Fig.14)

Se puede llevar a cabo el rellenado de agujeros mediante la interpolación. No obstante el proceso se ha de realizar con criterio lógico. Como vemos en la siguiente imagen la superficie sin mallar es pequeña, por lo tanto este proceso generaría una superficie que no altera la forma original. (Fig. 15)

Una vez mallada nuestra zona

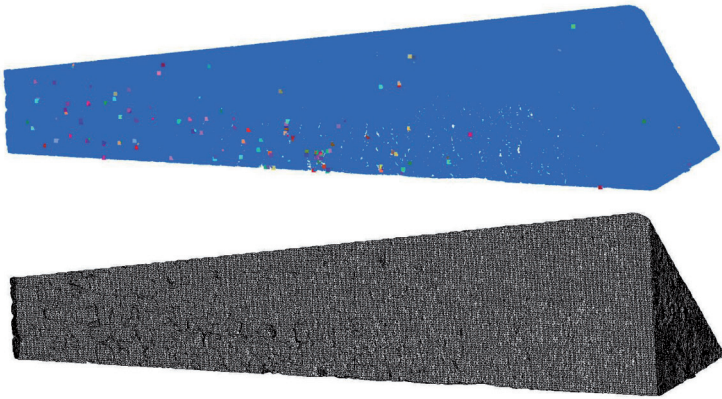


Fig. 14: Filtro a 2,5cm. de separación entre puntos, aplicado al muro de la fachada sur (Caso1).

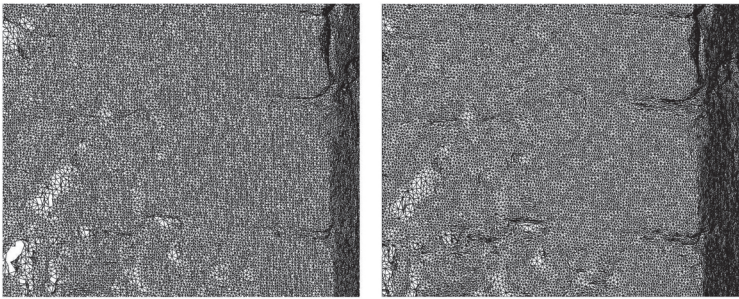


Fig. 15: Detalle del mallado practicado en el muro de la fachada sur, antes y después del rellenado de agujeros.

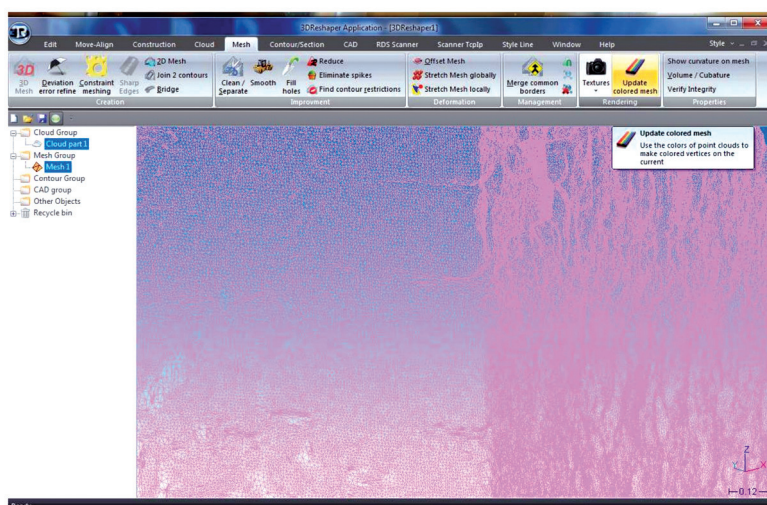


Fig.16: Función *Update colored mesh* para aplicar como textura el color que registra la cámara interna del láser escáner 3D.

(muro de la fachada sur) procedemos a aplicar las texturas al modelo (detalles de la mampostería, las esquinas de sillares, enlucidos, morteros...) este proceso resulto en nuestro caso fácil, ya que como comentamos anteriormente el programa *3DReshaper* tiene la peculiaridad de aplicar mediante la función *Update colored mesh* la textura real procedente de la cámara interna del láser escáner 3D. Recordemos que como dato de captura a cada punto se le asocia un color RGB (Fig. 16).

A continuación se muestra el muro de la fachada sur tratado con distintas resoluciones con el propósito de captar a simple vista la percepción obtenida en cada uno de los casos (Fig. 17). En relación a lo citado destacaremos que la clave está en encontrar el equilibrio al evitar la aparición de huecos en la superficie del objeto y la percepción más fidedigna de este. En el citado caso se llega a la conclusión de que la resolución óptima es de 1cm, ya que no posee oquedades y la percepción es muy buena.

#### Caso 2. Ventana de doble arco en la fachada Sur.

Para abordar el segundo elemento representativo del exterior de la torre comenzamos, como en el caso anterior, con el análisis del objeto a distintas resoluciones. La resolución media, sigue siendo 0,5cm al seguir en el exterior. En esta situación, como salvedad, decidimos sustituir la resolución de 2,5cm (ya que anteriormente pudimos observar que su comportamiento era muy similar a la de 5cm) por una resolución aún mayor: 0,1cm con el objetivo de saber que nos podía aportar ese nuevo valor. Por lo tanto los valores de estudio quedarían de la siguiente manera: 0,1- 0,5 - 1 y 5cm.

Una vez exportado el archivo con *Leica Cyclone* (Fig. 18) y con formato (.pts) abrimos con *3DReshaper* el archivo correspondiente a la zona en estudio.

Con *3DReshaper* cumplimos el propósito de homogeneizar filtrando la nube de puntos con las resoluciones establecidas anteriormente. Para 0,1cm (Fig. 19).

En la siguiente imagen al aplicar el filtro a 1cm (Fig. 20)

con el programa *3DReshaper* vemos que la mayoría de los puntos son identificados por el color naranja cumplen el requisito establecido (separación máxima entre puntos 1cm). Como consecuencia el mallado para este valor se producirá en casi toda la superficie.

En la siguiente imagen al aplicar el filtro a 5cm (Fig. 21) todos los puntos son identificados por el color grana y por lo tanto todos cumplen el requisito establecido (separación máxima entre puntos 5cm). Como consecuencia el mallado para este valor se producirá en toda la superficie.

De forma más clara podemos apreciar en las siguientes imágenes que una vez realizado el mallado a distintas resoluciones (0,5 y 5cm) como afectan estas en la aparición de huecos.

Para el caso de la resolución a 0,5cm observamos que se generan gran cantidad de huecos y que la percepción del detalle se asemeja a la realidad. En la imagen no se muestra toda la superficie texturizada, ya que hay pérdida de información por falta de concentración de puntos en algunas zona (Fig. 22).

Para el caso de la resolución a 5cm. podemos observar que apenas existen oquedades, sin embargo, la percepción del detalle del objeto deja de ser fidedigna. En esta imagen se muestra toda la superficie texturizada, aunque también existe pérdida de información en este caso por eliminación de puntos por exceso de concentración a la resolución de 5cm (Fig. 23).

Una vez mallada nuestra zona (ventana de la fachada sur) procedemos a aplicar las texturas al modelo mediante la función *Update colored mesh* que se corresponde con la imagen real de nuestro objeto de estudio. (Fig. 24)

Al realizar la comparación entre los distintos resultados, destacamos como apreciación que para las resoluciones extremas utilizadas (0,1 y 5cm), la pérdida de información resulta determinante, por lo que descartamos su elección. Para el primer valor este hecho se produce por la no visualización de toda la superficie, ya que sólo se aporta el color a los puntos que cumplen el criterio y hayan sido mallados previamente. En el segundo es debido a la falta de percepción causada por la pérdida de color ya que la información sobre el color viene implícita en cada uno de los puntos que fueron eliminados.

En relación a lo citado anteriormente la clave para nuestra elección está en encontrar el equilibrio al evitar la aparición de huecos en la superficie del objeto y la percepción más fidedigna de este. En el citado caso se llega a la conclusión de que la resolución óptima es, como en el caso anterior, de 1cm, puesto que no se observan oquedades y la percepción es buena.

#### Zona interior de la torre

En el interior de la Torre del Homenaje como elemento más significativos elegimos las bóvedas de cañón con rosca de ladrillo o lajas de piedra.



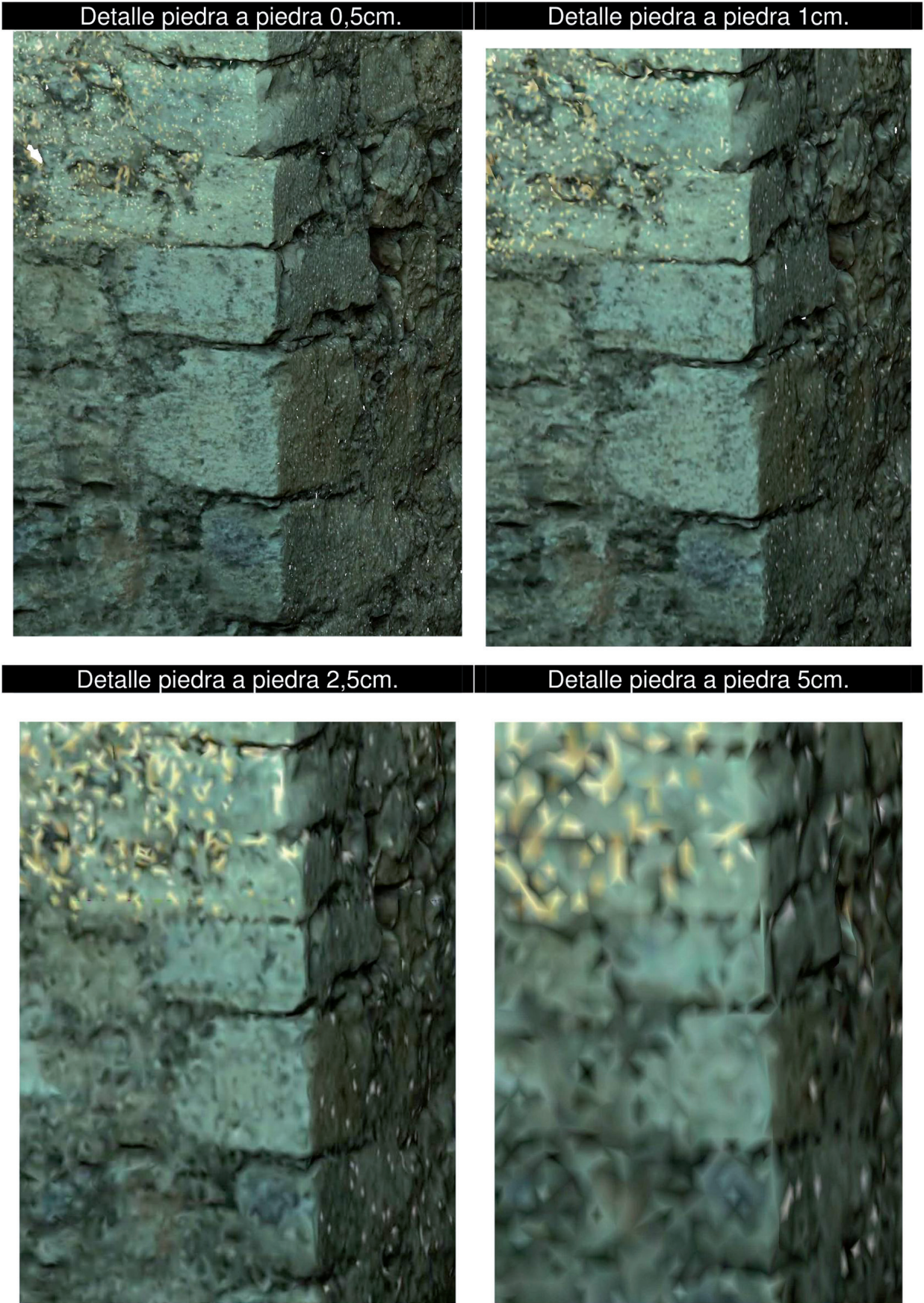


Fig. 17: Representación del muro de la fachada sur a distintas resoluciones.



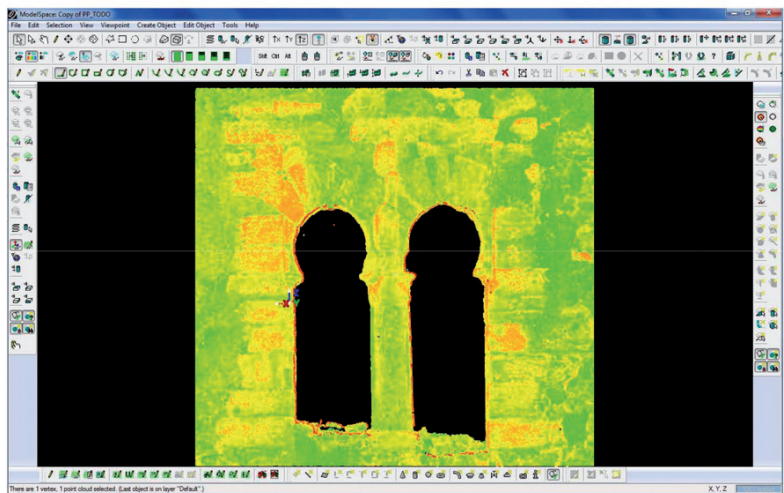


Fig. 18: Imagen del arco de herradura obtenida con Leica Cyclone mostrando la nube de puntos con uno de los 7 datos capturados: La intensidad (i) del láser escáner 3D.

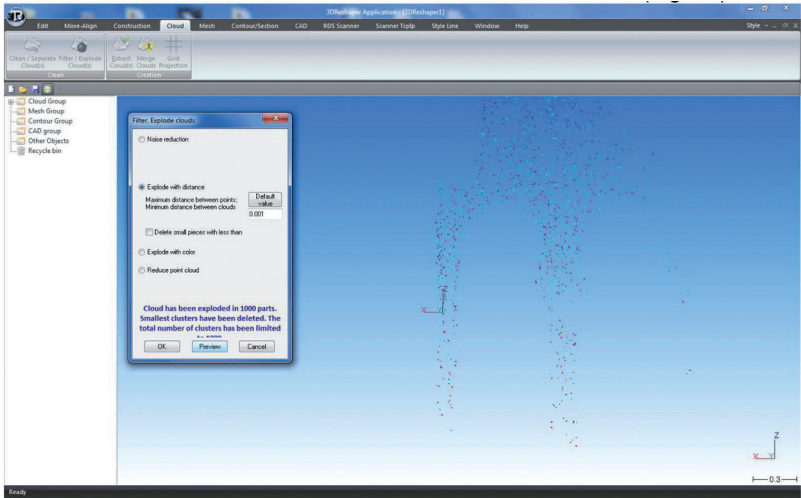


Fig. 19: Filtro de la nube de puntos a la resolución de 0,1cm. aplicado a la ventana de doble arco (Caso2).

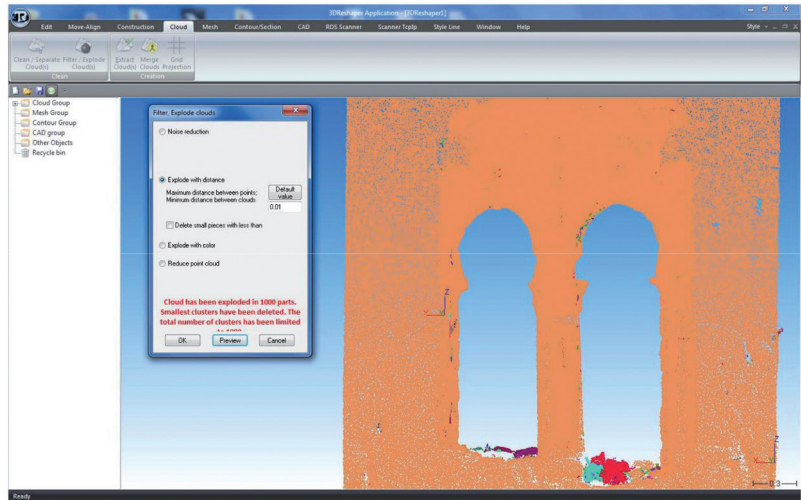


Fig. 20: Filtro de la nube de puntos a la resolución de 1cm. aplicado a la ventana de doble arco (Caso2).

Este elemento determinará la resolución del modelado en todo el interior. Por lo tanto el procedimiento que emplearemos será la asignación de distintas resoluciones al mismo elemento con el objetivo de determinar a que resolución se realiza el mallado de toda la superficie restante.

Caso 3. Bóveda de Cañón.

Como se viene repitiendo el proceso para abordar el análisis consistió en utilizar como dato de partida el valor de la resolución media (Tab. 5), que para el interior es de 1cm (valor obtenido al sumar las resoluciones configuradas en campo entre el numero de escaneos realizados en el interior) y respecto a los demás valores tendremos en cuenta la experiencia de los casos anteriores. No incrementaremos la resolución de valor 0,1cm ya que anteriormente no dio buen resultado, al igual que suprimiendo una resolución baja (5cm) que tampoco generó un resultado óptimo. Por lo tanto para este caso utilizaremos solo 2 valores: el de la resolución media en el interior 1cm y 3cm.

El archivo correspondiente a la zona en estudio (bóveda.pts) lo exportamos desde *Leica Cyclone*. (Fig. 25)

Posteriormente abrimos el archivo con 3DRshaper, y con el propósito de homogeneizar filtramos la nube de puntos con la resolución media que se corresponde en este caso con 1cm (Fig. 26).

Como observamos en la imagen anterior la mayoría de los puntos identificados por el color rojo cumplen el requisito establecido (separación máxima entre puntos 1cm). Por lo tanto no existirá pérdida de información y por consiguiente el mallado para este valor se producirá en casi toda la superficie.

Posteriormente a modo de consulta realizamos el filtro a 3cm (Fig. 27). Tras el análisis descartamos esta opción.

Como podemos observar en la imagen anterior la mayoría de los puntos identificados por el color verde se corresponde con los puntos que cumplen el requisito (separación máxima entre ellos 3cm), y que ocupa prácticamente la misma extensión de superficie que el filtro a 1cm. Por lo tanto en

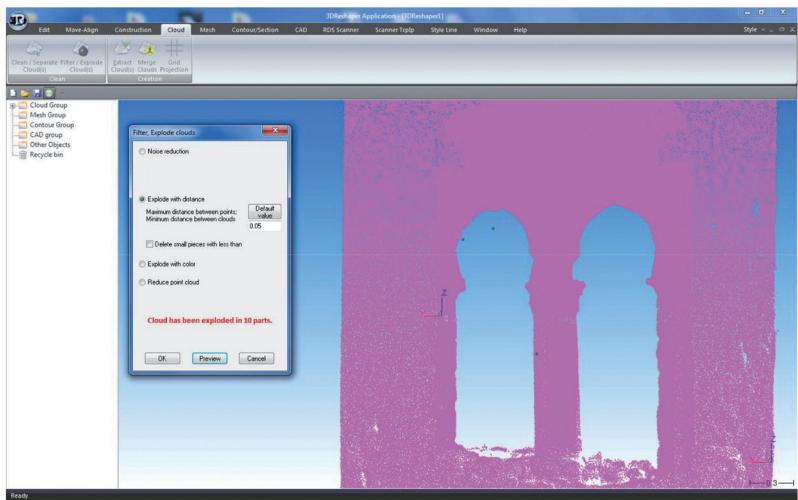


Fig. 21: Filtro de la nube de puntos a alta resolución con valor de 5cm aplicado a la ventana de doble arco (Caso2).

este caso tampoco se generarán huecos pero en contra la percepción del objeto será peor.

A continuación procedemos al mallado, con la resolución más óptima tras el análisis del caso a 1cm (Fig.



Fig. 22: Mallado de la ventana de doble arco a la resolución de 0,5cm.

28). Como se puede comprobar existe continuidad en casi toda la superficie.

Una vez mallada la bóveda interior procedemos a aplicar una textura neutra, sin color, con el propósito de resaltar el relieve del ladrillo o lajas de piedra (Fig. 28). Como se puede apreciar en esta imagen las formas que captan el láser escáner 3D son fieles a la realidad, perceptibles sin necesidad de superponer ninguna fotografía.

No obstante, aplicaremos su textura original al modelo mediante la función *Update colored mesh* (Fig. 30).

Por lo tanto elegimos 1cm como la resolución más adecuada para la representación de este objeto y por consiguiente en el interior de todo el edificio.

Conseguido el último de nuestros objetivos (difundir nuestro elemento de estudio tras el modelado y texturizado), estaremos en condiciones de facilitar el conocimiento del Patrimonio. Esto es especialmente interesante ya que permite una mayor difusión, llegando a un gran número de personas.

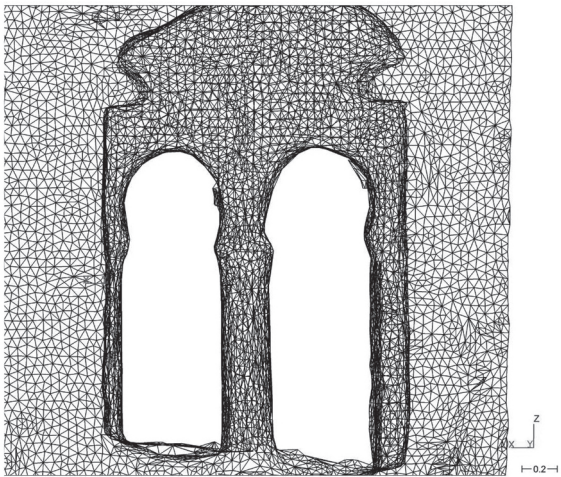


Fig. 23: Mallado de la ventana de doble arco a la resolución de 5cm.





Fig. 24: Representación de la ventana de doble arco a distintas resoluciones.



INTERIOR DE LA TORRE DEL HOMENAJE				
POSICIONAMIENTO		RESOLUCIÓN		
POSICIÓN	FECHA	mm.	SUPERFICIE (H X V)	PUNTOS
Station-009	07.07.2011	20	( 1179 x 3142 )	3.574.831
Station-010	07.07.2011	10	( 2357 x 6283 )	14.792.240
Station-011	07.07.2011	10	( 2357 x 6283 )	14.800.155
Station-012	08.07.2011	10	( 2357 x 6283 )	14.800.155
Station-013	08.07.2011	10	( 2357 x 6283 )	14.491.011
Station-014	08.07.2011	5	( 4713 x 12566 )	59.079.500
Station-015	08.07.2011	10	( 2357 x 6283 )	14.621.603
Station-016	08.07.2011	5	( 4713 x 12566 )	58.811.706
8	2	80	R. media 10mm.	194.971.201

Tabla nº 5: Datos de resolución del interior de la torre; a la resolución media le corresponde un valor de 10mm.

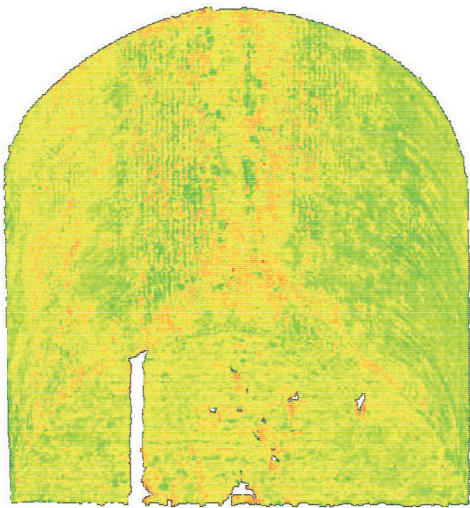


Fig. 25: Imagen de la bóveda obtenida con Leica Cyclone mostrando la nube de puntos con uno de los 7 datos capturados: La intensidad (i) del láser escáner 3D.

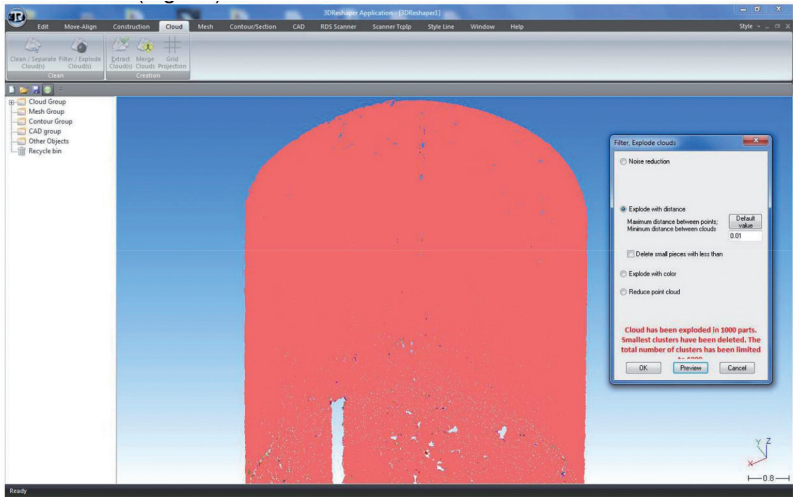


Fig. 26: Filtro de la nube de puntos a alta resolución con valor de 1cm aplicado a la bóveda de cañón (Caso3).

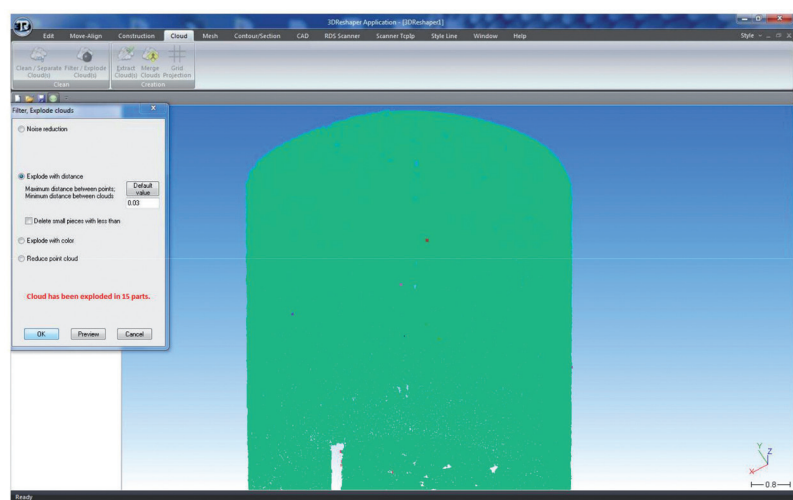


Fig. 27: Filtro de la nube de puntos a alta resolución con valor de 3cm aplicado a la bóveda de cañón (Caso3).

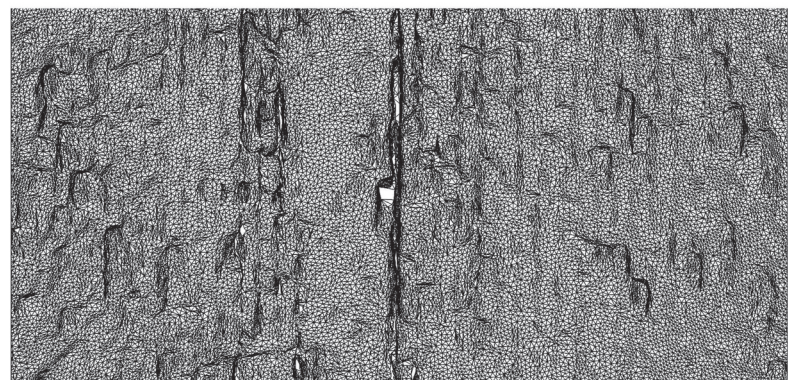


Fig. 28: Vista de la bóveda mallada a la resolución de 1cm.

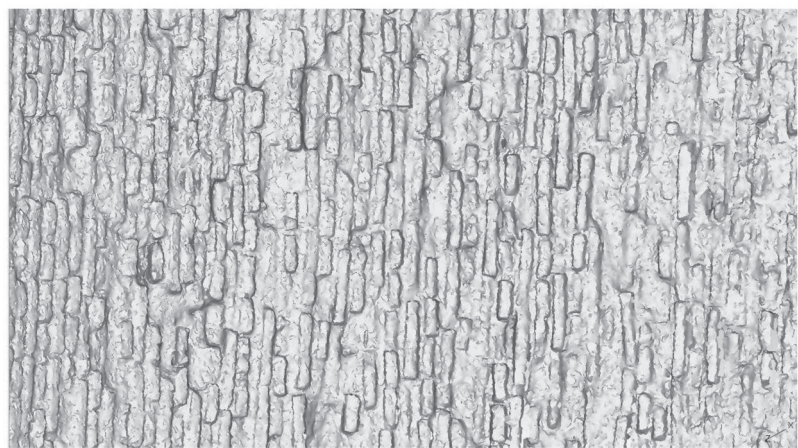


Fig. 29: Textura neutra sin color con el propósito de resaltar el relieve del ladrillo o lajas de piedra.



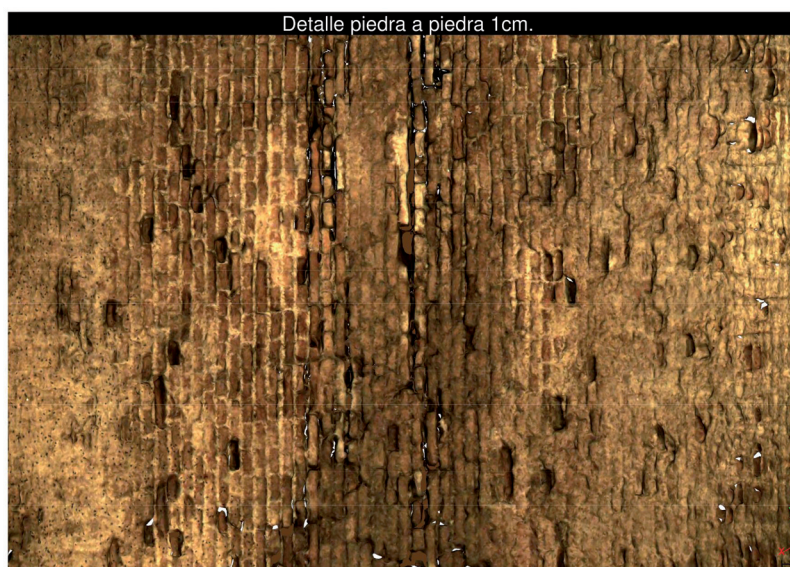


Fig. 30: Texturizado de la bóveda de cañón a la resolución de 1cm.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### Resultados

Tanto los casos del interior como del exterior nos permitieron modelar y texturizar todo el edificio a una única resolución de 1cm. Aplicada la textura ya al total del monumento, podrán ser exportados a otros programas en varios formatos de archivo: pts, ptx, entre otros. También existe la posibilidad de obtener ortofotos o perspectivas en formato de imagen (jpg, tif, bmp ...) y la posibilidad de exportar animaciones a formato avi.

Finalmente tras la elección de un potente software de visualización el observador podría elegir, entre otras, aquellas zonas donde el acceso a pie fuese literalmente imposible. Esto permitirá que se mueva con total libertad entre las diferentes partes y vistas de la torre, y así pueda tener una idea más personal del monumento en su conjunto.

### Conclusiones

Este trabajo es fruto de nuestra experiencia en el uso de la tecnología del láser escáner 3D tanto en el registro del patrimonio construido, para apoyo a la documentación como por otro lado en la relación entre resolución y percepción para la representación y posterior divulgación de nuestro objeto de estudio: la Torre del Homenaje en Priego de Córdoba.

Empezamos exponiendo los inconvenientes que presentó la citada tecnología tanto en la toma de datos como en el procesado de datos en gabinete.

El primer problema que hemos detectado es que para aplicar esta tecnología de registro es necesario soportar un coste elevado tanto de los equipos como de los programas informáticos que permiten el manejo de la base de datos obtenida, aún así, se ha extendido su aplicación en el

ámbito del Patrimonio Cultural (p.e., el volumen LICHTI *et alii*, 2008). En nuestro caso, el uso de los equipos pudo llevarse a cabo gracias a la Universidad de Córdoba y más concretamente al Departamento de Ingeniería Gráfica que puso todos los recursos materiales que tenía a su alcance para la realización del presente estudio.

Otro aspecto importante a destacar es el tiempo empleado en la toma total de datos, que fue de 18 horas. Se practicaron 8 escaneos tanto en el exterior como en el interior del edificio. Del total de las horas empleadas en la toma de datos 12 se llevaron a cabo en el exterior frente a las 6 horas que duró la digitalización en el interior del edificio. Por lo tanto no cabe duda, que los factores que intervienen en el exterior (mu-cha separación entre posicionamientos, aspectos climáticos, capturas localiza-

das...) son más condicionantes en la duración de los trabajos que los surgidos en el interior (poca separación entre posicionamientos, no se está expuesto a las condiciones climáticas, capturas a bóveda completa ...).

Como apunte diremos que una correcta planificación, argumentada con una inspección previa al objeto de estudio, puede subsanar la mayoría de los inconvenientes que se generan en la toma de datos.

Cabe destacar la presencia de elementos no deseados (tanto de pájaros en la zona interior de la torre como de tendido eléctrico en el exterior de esta). Estos elementos generan gran cantidad de residuos y su eliminación manual de la base de datos supone un importante esfuerzo respecto a la totalidad del trabajo. Este condicionante debe tenerse en cuenta a la hora de registrar un detalle a resolución piedra piedra, en los que estos elementos pueden ocultar parte del sitio a registrar. Además, si la zona que queremos digitalizar es exterior, esta toma de datos se verá afectada tanto por las condiciones climáticas como por la hora de salida y puesta de sol, en contra de lo que sucede cuando la digitalización se realiza en el interior de un edificio.

Como principal virtud esta tecnología nos ha permitido obtener un archivo digital de calidad y detalle en un momento concreto de la vida de nuestro objeto de estudio, por lo tanto se garantiza la perpetuidad digital de la Torre del Homenaje dentro del patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba. No obstante, como aspecto negativo de la base de datos generada diremos que su manejo es laborioso y necesita de programas que faciliten tanto la visualización como su uso.

Como conclusión final diremos que la búsqueda y posterior consecución de la representación fidedigna piedra a piedra de nuestro objeto en estudio a través de la tecnología Láser Escáner 3D es un signo que pone en valor la metodología empleada y diferencia a esta de otras.



## AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han contribuido directa e indirectamente a la completa realización de este trabajo, y en especial:

A mi director, D. Francisco de Paula, por sus explicaciones y correcciones, por su completa disponibilidad e interés mostrado cada vez que lo he requerido.

A César Hervas por su aportación en este trabajo, por el tiempo dedicado (a cualquier hora y en cualquier momento) y por acercarme a esta tecnología que ha acabado por apasionarme. Gracias

A mis padres y hermanos, por la creencia y confianza que tienen hacia mi persona, que me motivan en los momentos de desánimo. A mis suegros, por su inestimable colaboración y apoyo.

Y muy especialmente a mi mujer e hijos por sus palabras para mi calma, por la ausencia de ellas en mis disgustos, por aparecer en el momento justo y a la hora indicada, por ser partícipes con su ternura de mi sonrisa, por borrar mi dolor con alegrías... Por todo ello y mucho más... gracias.

## BIBLIOGRAFÍA

ANGULO IÑIGUEZ, D.(1952): El castillo de Priego de Córdoba, **B.R.A.C.**, 68, Córdoba.

ARAYICI, Y. (2007): "An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment", **Automation in Construction**, nº 16 (6), pp. 816- 829.

ARCHEOGUIDE (2003). **Archeoguide: Augmented Reality-based Cultural Heritage on-site guide**. [en línea]. <http://archeoguide.intranet.gr/project.htm> [consulta 19/08/2003].

BOEHLER W.; BORDAS VICENT M.; MARBS A.; (2003): "Investigating Laser Scanner Accuracy", **XIXth CIPA Symposium at Anatolia**. Turkey.

BUCKSCH, A.; LINDENBERGH, R., (2008), "CAMPI-NO—A skeletonization method for point cloud processing", **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, nº 63 (1), pp. 115- 127.

CARMONA, R., LUNA, D. y MORENO, A. (2003): "Excavaciones arqueológicas en el castillo de Priego (Córdoba): informe de la Intervención Arqueológica Puntual de 2002-2003", **Antiquitas**, nº 15, pp. 85-204

MAÑANA-BORRAZÁS, P.; RODRÍGUEZ PAZ, A.; BLANCO-ROTEA, R. (2008), "Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela)", **Arqueología de la Arquitectura**, nº 5, pp. 15-32.

GARLAND, M; HECKBERT, P. (1997): "Survey of polygonal surface simplification algorithms", en **Multiresolution Surface Modeling Course Notes of SIGGRAPH**, 1997.

NÚÑEZ ANDRÉS, M.A.; BUILL POZUELO, F. (2009), "Evolution of the architectural and heritage representation", **Landscape and Urban Planning**, Vol. 91, no. 2, pp. 105-112.

Leica HDS3000 - Manual del Usuario.

[http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/ndef/lgs\\_5570.htm](http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/ndef/lgs_5570.htm)

LICHTI, D.; PFEIFER, N.; MAAS, H-G. (eds.), 2008, "Theme issue Terrestrial Laser Scanning". **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n.º 63 (1).

ROCA-PARDIÑAS, J.; LORENZO, H.; ARIAS, P.; ARMESTO, J. (2008), "From laser point clouds to surfaces: Statistical nonparametric methods for three-dimensional reconstruction", **Computer-Aided Design**, nº 40 (5), pp. 646-652.

STONE, R.J.; CH'NG, E. (2006): "Enhancing virtual reality with artificial life: Reconstructing a flooded European mesolithic landscape", **Presence-teleoperators and virtual environments**, nº 15, pp. 341-352.

UNESCO (2003): **Criteria for the inclusion of properties in the World Heritage list**.

[en línea]. <http://whc.unesco.org/criteria.htm> [consulta 19/08/2003]

Más información sobre las publicaciones de los autores y este Instituto en el Repositorio Institucional de CSIC de acceso abierto **DIGITAL CSIC** <http://digital.csic.es/>

ANEXO I

EJEMPLO DE USO DE LA BASE DE DATOS  
TRATADA COMO RECURSO PARA LA DOCU-  
MENTACIÓN

Verificar los indicios de equidad del volumen entre las plantas de la TH

Como aclaración, si nuestro reto hubiese sido sólo realizar uno de los objetivos propuestos (procesado de datos para apoyo a la documentación) concluiríamos con una base de datos homogénea y estructurada por zonas. A continuación hemos puesto un ejemplo, que pone de manifiesto el valor de este archivo histórico.

En el interior del edificio, como hemos visto anteriormente, la P1 esta subdividida por una entreplanta y muchísimo mobiliario acumulado, hecho que condicionó la toma de datos, capturando solo la bóveda dentro de la entreplanta superior, y los límites que constituyen el contorno de la entreplanta inferior para así poder verificar los indicios de una única planta P1 ocupando el mismo volumen que las restantes plantas (P2 y P3).

Pues bien, tras el procesado de la base de datos para su posterior transformación en parte de nuestro archivo histórico, conseguimos visualizar mediante la sección longitudinal y transversal del interior de nuestro edificio, si esos indicios eran ciertos (Fig. 31).

El archivo histórico obtenido nos permitiría saber como era nuestro objeto en el momento del registro. Esta documentación resultará muy valiosa cuando se vaya a realizar alguna intervención en el elemento, ya que consti-

tuye un registro tridimensional de la superficie del objeto, que daría la posibilidad de reconstruirlo en caso de desastre.

ANEXO II

USO DE LA BASE DE DATOS CON FINES  
DIVULGATIVOS

Ejemplo 1: Modelo 3D mediante ortofotos de la bóveda de cañón en el interior de la P3

En el primer ejemplo de uso de nuestra base de datos como elemento divulgativo fue necesario la utilización de tres programas informáticos para conseguir el objetivo: PhotoShop, PtGui, y el Leica Cyclone 7.1.

Respecto al primero, el PhotoShop, se utilizó al surgir la necesidad de realizar procesos de retoque fotográfico.

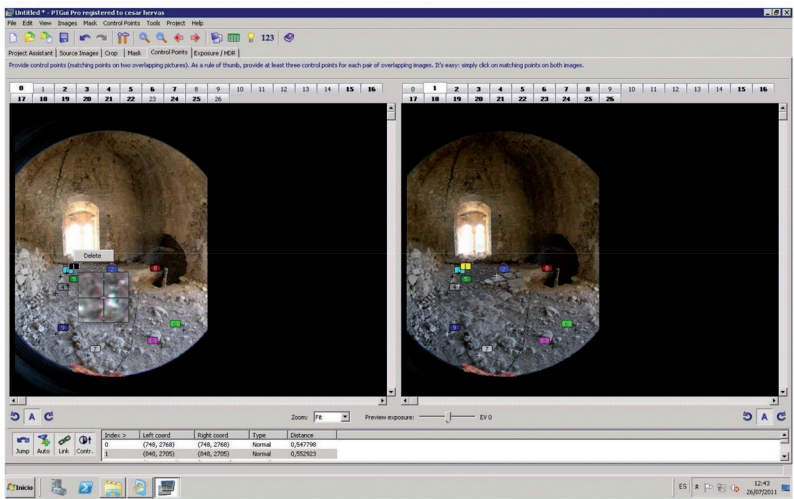


Fig. 32: Control de puntos para asociación de imágenes y la correspondiente creación de panorámica en PtGui.

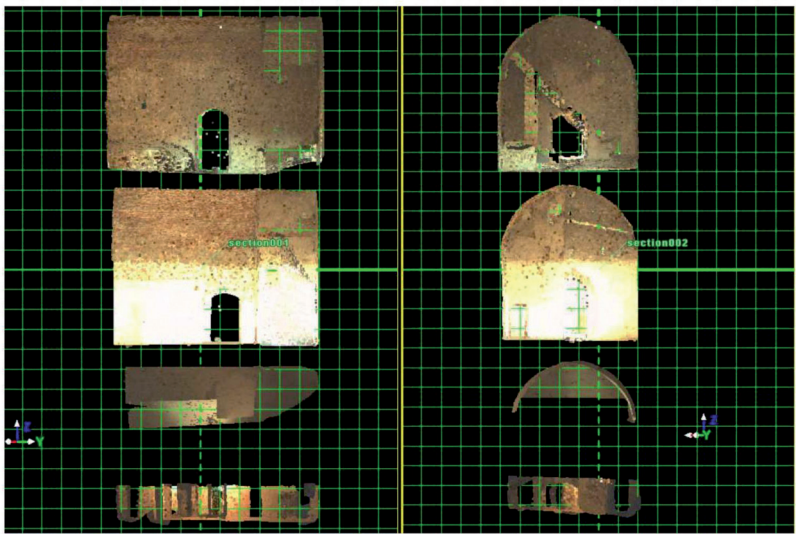


Fig. 31: Detalle de las SL y ST de la NP (base de datos ya tratada con una densidad entre puntos de 1 cm.) del volumen interior de la torre visto a través del programa L.Cyclone, con rejilla de referencia de 1 metro.

Nos permite modificar el contraste y el brillo, para dar mayor continuidad a la tonalidad, así como ajustar el tono, saturación y luminosidad de las fotografías que utilicemos como texturas.

PtGui Pro lo utilizamos para poder aportar como textura las fotos realizadas con la cámara externa. Estas se realizaron con un objetivo panorámico o también denominado ojo de pez. En nuestro caso hemos incorporado para el programa PtGui la calibración de la cámara y la corrección simultánea de la distorsión a la vez que se rectifica la imagen.

Debemos de tener presente las posibilidades de salida de PTGWI, como recurso divulgativo (Fig. 32) :

1. Archivo \*.mov\_ visualiza película 360° \_software - Quick time Player.

- 2. Archivo \*.tif\_fotografía Panorámica horizontal\_cualquier visor fotografico.
- 3. Archivos \*.jpg\_ desarrollo de las 6 caras del cubo a partir de la panorámica \*.tif.

Este software también da la posibilidad de situar automáticamente las imágenes rectificadas (ortofotos) en su posición tridimensional dentro del Leica Cyclone.



Fig. 33: Vista 3D del modelo con textura de la cámara interna sin aplicar aún las ortofotos obtenidas con la cámara externa.

Finalmente con el software de Leica Cyclone 7.1, se asignará al modelo tridimensional superficies de color sólido o texturas extraídas de las propias imágenes realizadas con la cámara externa; con el fin de permitir un análisis y una visualización de mejor calidad.

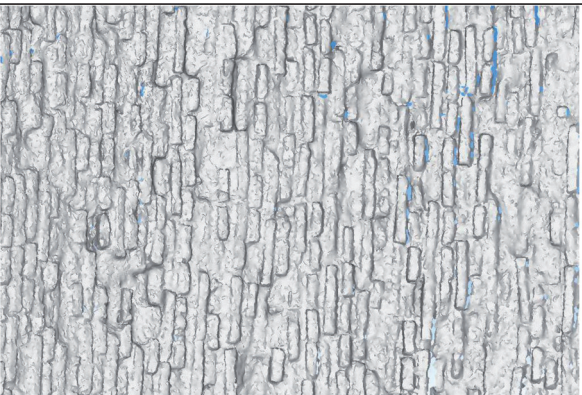


Fig. 34: Vista 3D del modelo con textura de la cámara externa aplicadas las ortofotos.

Con la intención de mejorar nuestro resultado en el interior de la torre, hemos incorporado las fotografías obtenidas con la cámara externa a la malla de la superficie que se quiere representar, en nuestro caso la bóveda de cañón de la planta tercera. El programa Leica Cyclone permite importar imágenes y vincularlas a los datos existentes mediante un proceso de rectificación de esa imagen. Con esto se logra dar uniformidad a los tonos de color y se mejora el aspecto final. En nuestro caso esta superposición se realizó sobre una malla (.stl) exportada con 3DReshaper, al visualizarse la superficie, realmente se logra conformar un modelo 3D a partir de la ortoimagen de la bóveda, con la que se alcanzó gran nivel de detalle.

Ejemplo 2: Representación de un video 3D de la TH

En el segundo ejemplo de uso de nuestra base de datos como elemento divulgativo queremos que el usuario vea una simulación gráfica 3D generada por ordenador.

Para nuestro caso fue necesario sólo la utilización del software de Leica, Cyclone 7.1 el proceso se concentró en tres pasos:

- 1. Crearemos una trayectoria (path) mediante la definición de varios puntos clave por los que se va a mover la cámara, ajustando una spline (insertamos varias cámaras dependiendo de cuantos puntos de vista queramos y unimos estos).
- 2. Editamos la ruta (manipulando los tensores de la spline y orientaremos las cámaras con la función: Show Rotation Ande).
- 3. Editamos los frames (factor dependiente de la duración de nuestra animación final) en nuestro caso tenemos 3.000 frames y la animación se crea con un ratio de 30 frames por segundo (fps), la animación final durará 100 s. Como recomendación diremos que es conveniente en este paso quitar de la visualización las cámaras y las splines para que no aparezcan en la animación (Fig. 35).

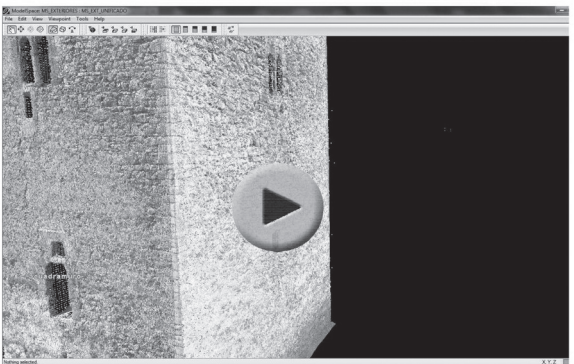


Fig. 35: Vista del video que representa la NB de la TH generado mediante el software Leica Cyclone.

Obviamente el espectador en nuestro caso tiene un papel pasivo, sólo como observador, pero se debe destacar que existe la posibilidad de conseguir una experiencia inmersiva e interactiva entre el espectador y el objeto en estudio.



Ken Perlin (Director del Media Research Laboratory en New York University): *“Cuando accedo a un espacio virtual lo más importante para mí es tener la sensación de estar*

*accediendo a un mundo que me afectará emocionalmente y en el que me puedo sumergir. Y cuando es así, me maravillo, como si fuera un niño”* (GAUTHIER, 2005).